

Université de Sherbrooke
Faculté de génie
Département de génie électrique et de génie informatique

**CONCEPTION D'UN MONTAGE DE
CARACTÉRISATION SPÉCIALISÉ DANS L'ÉTUDE
DE CONVERTISSEURS DE PUISSANCE LASER**

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie électrique

Vincent CORMIER

Sherbrooke, Québec, Canada
Avril 2020

MEMBRES DU JURY

Richard Arès

Directeur

Simon Fafard

Codirecteur

Abderraouf Boucherif

Rapporteur

Table des matières

1	Introduction	8
2	Base théorique	10
2.1	Électromagnétisme	10
2.1.1	Propriétés de l'électron	10
2.1.2	Milieux réfringents et lois de Snell-Descartes	10
2.1.3	Équations de Fresnels et atténuation de l'onde électromagnétique	12
2.1.4	Interférence constructive et destructive entre deux ondes électromagnétiques	14
2.2	Mécanique quantique	15
2.2.1	Dualité onde-corpuscule	15
2.2.2	Quantification de l'énergie	18
2.3	Théorie des semiconducteurs	19
2.3.1	Structure de bande	19
2.3.2	Jonction p/n et dopage	21
2.3.3	Niveau de Fermi et zone de déplétion	21
2.3.4	Cellule multi-jonction et jonction tunnel	24
3	État de l'art	26
3.1	Structure des dispositifs photovoltaïques	26
3.1.1	Structure d'une cellule simple jonction	26
3.1.2	Structure des cellules multi-jonction	28
3.2	Caractérisation des paramètres de diode	31
3.2.1	Description de la courbe I-V d'une diode	31
3.2.2	Courbe I-V avec illumination	32
3.2.3	Courbe I-V sans illumination	34
3.2.4	Efficacité quantique	35
3.2.5	Observation visuelle des défauts	35
4	Description de l'équipement utilisé	37
4.1	Montage expérimental initial	37
4.1.1	Mesure de courant, de tension et de température	37
4.1.2	Lasers monochromatiques	38
4.1.3	Source de puissance	38
4.1.4	Mesure de puissance du faisceau laser	38
4.2	Modifications apportées au montage expérimental	39
4.2.1	Caractérisation I-V en fonction de l'angle d'incidence	39
4.2.2	Caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde	42
5	Mise en place des protocoles de mesures automatisés à partir du programme d'acquisition spécialisé	48
5.1	Connexion entre l'ordinateur et le montage	48
5.2	Communication avec le programme d'acquisition Labview	48
5.3	Programme d'acquisition Labview	49
5.3.1	Interface graphique	49
5.3.2	Mesure I-V simple	52
5.3.3	Mesure I-V sous illumination	52
5.3.4	Analyse des résultat et fichier de sauvegarde	54
5.3.5	Caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence	55
5.4	Fonctionnalités supplémentaires	56

5.4.1	Contrôle avancé des instruments	56
6	Calibration du montage et caractérisation des convertisseurs de puissance laser	57
6.1	Coefficient de proportionnalité Pévac-Pfibre	57
6.2	Puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission	59
6.3	Maintenance du SolsTiS	62
6.4	Caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde	64
6.5	Caractérisation I-V en fonction de l'angle d'incidence	68
7	Conclusion	73

Table des figures

2.1	Diagramme d'un faisceau lumineux frappant l'interface entre deux milieux avec des indices de réfraction différents.	11
2.2	Schéma de la structure d'une fibre optique.	11
2.3	Illustration de la dispersion de la lumière blanche dans un milieu transparent.	12
2.4	Illustration de faisceaux lumineux frappant deux surfaces diffusantes différentes.	12
2.5	Représentation d'une onde électromagnétique	13
2.6	Orientation de la composante du champ électrique de la lumière en fonction du plan d'incidence pour la polarisation P et S	13
2.7	Graphique du taux d'atténuation de la lumière dans une fibre optique en fonction de la longueur d'onde.	14
2.8	Représentation graphique d'interférence constructive et destructive.	15
2.9	Schéma d'un tube cathodique dans un oscilloscope.	16
2.10	Schéma de l'expérience de diffraction de la lumière à travers deux fentes.	16
2.11	Expérience des fentes de Young avec des électrons.	17
2.12	Patron d'interférence obtenu suite à une expérience de diffraction d'électron	17
2.13	Schéma de la fonction d'onde d'un électron traversant une barrière de potentiel grâce à l'effet tunnel.	17
2.14	Schéma correspondant aux éléments présents dans l'effet Compton	17
2.15	Représentation graphique des nuages électroniques de chaque orbitale atomique.	19
2.16	Spectre d'absorption de l'atome d'hydrogène accompagné des transitions électroniques équivalentes.	19
2.17	Diagramme de la création de bandes d'énergie suite à la séparation des niveaux d'énergie dans un système polyatomique.	20
2.18	Structure de bande d'un métal, d'un isolant et d'un semiconducteur	20
2.19	Représentation graphique du niveau de Fermi dans les différents types de conducteur.	22
2.20	Diagramme de la zone de déplétion à l'interface d'une jonction p/n	23
2.21	Diagramme de la distribution des porteurs de charge dans la zone de déplétion d'une jonction p/n.	23
2.22	Efficacité quantique des trois type de jonctions dans une cellule photovoltaïque multi-jonction.	24
2.23	Structure de bande à l'interface d'une jonction tunnel.	24
3.1	Vue en coupe d'une cellule solaire simple jonction.	27
3.2	Vue de côté d'une cellule photovoltaïque avec ses contacts métalliques.	27
3.3	Surface d'une cellule photovoltaïque recouverte de gridlines.	27
3.4	Schéma des réflexions de la lumière au contact d'une couche antireflet.	27
3.5	Schéma de la structure d'une cellule triple jonction à concentration.	29
3.6	Schéma de la structure d'un phototransducteur avec vingt jonctions p/n.	29
3.7	Courbe I-V caractéristique d'une diode.	32
3.8	Courbe I-V d'une cellule photovoltaïque avec et sans source de lumière externe.	32
3.9	Courbes I-V et P-V typique d'une cellule photovoltaïque.	33
3.10	Représentation graphique des paramètres utilisés dans le calcul du <i>Fill Factor</i> et impact des résistances parasites sur la forme de la courbe I-V.	33
3.11	Courbe I-V caractéristique d'une diode sans illumination.	34
3.12	Impact des résistances parasites sur le logarithme de la courbe I-V sans illumination.	34
3.13	Imagerie par transmission des rayons-X permettant d'observer des défauts de fabrication.	36
3.14	Image des défauts dans le corps d'une cellule obtenue à partir de la photoluminescence et l'électroluminescence.	36
4.1	Tektronix Keithley 2601B	37
4.2	Tektronix Keithley 2510	37
4.3	Rhode & Schwartz HMP2020	38

4.4	Sorensen DLM 20-30	38
4.5	Newport 843-R-USB	39
4.6	Représentation des roues magnétiques à l'intérieur d'un moteur pas-à-pas hybride	40
4.7	Représentation des paires d'électroaimant à l'intérieur d'un moteur pas-à-pas hybride	40
4.8	Image du support à échantillon attaché au moteur pas-à-pas	40
4.9	Arduino Uno connecté au Easy Driver	41
4.10	Diagramme des connexions entre l'Arduino Uno, le Easy Driver et le moteur pas-à-pas	41
4.11	Image des différentes composantes du SolsTiS	42
4.12	Schéma du parcours optique du faisceau dans le SolStis	43
4.13	Schéma de la configuration "papillon" dans le SolsTiS	44
4.14	Représentation d'un interféromètre de Fabry-Perot	44
4.15	Angstrom WS6-600	45
4.16	Module de contrôle ICE-BLOC	46
4.17	Interface web utilisé pour contrôler la longueur d'onde d'émission du SolsTiS	46
5.1	Interface principal du programme d'acquisition Labview	50
5.2	Affichage des résultats	50
5.3	Interface graphique consacrée à l'affichage des résultats.	51
5.4	Exemple de fichier de sauvegarde suite à une caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde	55
5.5	Interface de communication avec l'instrumentation	56
5.6	Interface de contrôle de l'instrumentation	56
6.1	Représentation graphique de la corrélation entre la puissance de sortie à l'extrémité de la fibre et la puissance éjecté du système.	58
6.2	Évaluation de la stabilité de la puissance de sortie du laser et de la longueur d'onde d'émission en fonction du temps.	59
6.3	Graphique de la puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission.	60
6.4	Graphique de la puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission autour de la zone de transition à 820 nm.	61
6.5	Graphique de la puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission autour de la zone de transition à 820 nm.	61
6.6	Représentation graphique de la perte de puissance de sortie du laser accordable au fil du temps.	63
6.7	Représentation graphique du gain en puissance suite aux étapes de maintenance.	64
6.8	Comparaison entre les courbes d'efficacité en fonction de la longueur d'onde pour les échantillons PT6 G5793-099FS (rouge) et PT6 G5793-073FS (noir).	66
6.9	Comparaison entre plusieurs courbe I-V prises à différentes longueurs d'onde de l'échantillon PT6 G5793-099FS	67
6.10	Exemple de courbe I-V indiquant la présence d'un problème dans le procédé de mesure.	68
6.11	Courbe d'efficacité en fonction de l'angle d'incidence effectué sur l'échantillon PT6-H7233-043FS.	71
6.12	Image prise avant une mesure d'efficacité en fonction de l'angle d'incidence.	72
6.13	Image prise à la fin d'une mesure d'efficacité en fonction de l'angle d'incidence.	72

Résumé

Le développement de dispositifs photovoltaïques est un processus complexe qui nécessite une compréhension en profondeur de leur fonctionnement et des particularités des matériaux semiconducteurs. Une multitude de méthodes sont communément employées pour déterminer les caractéristiques d'un dispositif et pour étudier le comportement d'une cellule photovoltaïque en opération. Ces techniques ont d'abord été conçues en fonction des attributs spécifiques des cellules solaires, c'est-à-dire que les conditions expérimentales simulent une exposition à la lumière du Soleil. Par contre, certains types de dispositifs photovoltaïques sont conçus pour convertir l'énergie provenant d'une source laser, or les méthodes de caractérisation conventionnelles ne sont pas adéquates pour ce genre de cellules. Ce projet porte donc sur l'adaptation d'un montage de caractérisation dans le but d'étudier les attributs de convertisseur de puissance laser avec des conditions expérimentales plus pertinentes à leur mode de fonctionnement. La fonction principale d'un tel montage consiste à effectuer une mesure du courant généré par une cellule illuminée tout en variant la tension appliquée aux bornes. Une analyse des résultats obtenus peut ensuite être effectuée pour déterminer les caractéristiques du matériau semiconducteur, comparer les performances expérimentales à celles théoriques et finalement pour identifier des défauts dans le dispositif.

Le premier objectif de ce projet consistait à installer une source de puissance laser à longueur d'onde variable. Une calibration de la puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission a été effectuée et des régimes de puissances ont été identifiés. Les fluctuations étaient trop importantes pour pouvoir prédire avec confiance la puissance qui atteignait l'échantillon. Pour remédier à la situation, un wattmètre a été placé devant la sortie du laser où une portion excédentaire du faisceau était déviée afin d'évaluer la puissance du laser durant une mesure. La puissance à la sortie du système était contrôlée par un polariseur linéaire sur le parcours optique. Une étape de calibration a été faite pour vérifier que le rapport entre la puissance de sortie et celle éjectée du système est stable. Un rapport expérimental a été établi afin de pouvoir déduire la puissance de sortie du laser à partir de la mesure de puissance effectuée par le wattmètre. Suite à la découverte d'une diminution graduelle de la puissance de sortie au fil du temps, une maintenance du système qui consiste à déshumidifier la cavité du laser et à réaligner les miroirs dans le réseau optique a été effectuée. Une analyse de résultats obtenus à partir du montage a été réalisée afin d'exposer les nouvelles capacités du système. Le deuxième objectif principal du projet consistait à ajouter un montage de caractérisation I-V en fonction de l'angle d'incidence du faisceau laser. Tout comme pour une cellule solaire, l'angle d'incidence de la lumière peut avoir un impact significatif sur l'efficacité du système. Un moteur pas-à-pas contrôlé par une carte Arduino a été installé de manière à faire pivoter un échantillon durant une mesure. Des supports fabriqués par impression 3D ont été utilisés pour attacher les différents formats de dispositifs au tronc du moteur et la fibre optique acheminant la lumière a été positionnée au dessus de l'échantillon. Un exemple d'analyse de résultats obtenus à partir du montage a ensuite été réalisé pour démontrer les nouvelles fonctionnalités du système. Finalement, un programme d'acquisition Labview a été développé afin de contrôler automatiquement chaque composante du montage. L'optimisation des paramètres de mesure fait en sorte que les séances de caractérisation ont été plus rapides et que les risques associés à l'utilisation de sources lasers à haute puissance ont été réduits.

Mots-clés : photovoltaïque, source laser, caractérisation, paramètres de diode, courbe I-V

1 Introduction

En réponse à l'évolution du réchauffement climatique, un intérêt particulier est accordé au développement de technologies de production d'énergie renouvelable. Chaque innovation dans le domaine a la possibilité d'améliorer la qualité de vie des communautés plus favorisées en plus de faciliter l'accès à l'énergie aux habitants de pays en voie de développement. Certaines méthodes de génération d'énergie offrent une plus grande flexibilité au niveau du format et des cas d'utilisation. Notamment, les dispositifs photovoltaïques permettent non seulement de convertir l'énergie solaire en électricité, mais aussi de capter la lumière lors de la prise d'une photo avec une caméra ou encore de mesurer la puissance d'un faisceau laser. Un usage moins répandu des appareils photovoltaïques est la transmission de puissance électrique par voie optique. En reliant une source de puissance laser et une cellule photovoltaïque spécialisée par le biais d'une fibre optique, un signal électrique peut être transporté sans nécessiter de câblages métalliques. Cette configuration assure que la qualité et l'intensité ne sont pas affectées par l'environnement. En effet, un faisceau lumineux se propageant dans une fibre optique n'est pas sujet aux interférences des champs électriques et magnétiques et ne dissipe pas de chaleur par résistance. Le dispositif photovoltaïque compris dans un tel système, un phototransducteur de puissance laser, est conçu de façon à maximiser la conversion de la lumière à une seule longueur d'onde au lieu de couvrir le spectre d'émission du Soleil. Cette particularité implique que certaines modifications doivent être effectuées au niveau du processus de développement des dispositifs, plus précisément durant les étapes de caractérisation. L'étude des attributs d'une cellule photovoltaïque est typiquement effectuée à l'aide de la courbe I-V, soit le comportement en courant du dispositif sous illumination à différentes valeurs de tension appliquées. L'analyse de la courbe permet ensuite de former un profil des performances du dispositif. Dans le cas des cellules solaires, la source de lumière est une lampe polychromatique avec un spectre d'émission similaire à celui du Soleil. Par contre, la caractérisation I-V d'un phototransducteur nécessite une substitution de la source lumineuse pour une source laser, ce qui apporte un certain degré de complexité au système.

Ainsi, ce projet porte sur l'adaptation des méthodes conventionnelles de caractérisation de cellules photovoltaïques afin de considérer les particularités des convertisseurs de puissance laser à l'étude. Tout d'abord, le montage expérimental doit pouvoir effectuer des mesures I-V tout en prenant en compte l'aspect monochromatique et la propagation unidirectionnelle d'un faisceau laser. Étant donné que l'efficacité d'un dispositif photovoltaïque est affectée par la longueur d'onde de la lumière incidente, un système de caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde doit être intégré au montage. De plus, l'angle selon lequel le faisceau laser frappe la surface du dispositif a un impact sur ses performances, ce qui implique qu'un système de caractérisation I-V en fonction de l'angle doit aussi être ajouté. Une caractérisation détaillée d'un convertisseurs de puissance laser nécessite des mesures I-V à plusieurs longueurs d'onde et angles d'incidence, ce qui peut allonger le processus lorsque les manipulations doivent être faites manuellement. Le programme d'acquisition doit donc être amélioré pour comprendre des protocoles de mesure automatiques qui manoeuvrent les différentes composantes du montage. Ce système se distingue des montages de caractérisation I-V communément utilisés par son contrôle accru des paramètres de mesure tels que la

longueur d'onde incidente, en plus de permettre l'étude des performances de convertisseurs de puissance laser.

Le segment théorique initialement présenté dans ce mémoire contient les notions d'électromagnétisme, de mécanique quantique et de physique des semiconducteurs pertinentes à la compréhension du fonctionnement des dispositifs photovoltaïques. Ensuite se trouve une revue de l'état de l'art qui inclut une description de différents types de cellules photovoltaïques ainsi que des résultats découlant d'une séance de caractérisation. Une explication du rôle et des spécifications de chaque instrument de mesure est suivie par une définition des protocoles de mesure automatiques intégrés dans le programme d'acquisition pour former un profil détaillé du montage expérimental. Finalement, une analyse des résultats de caractérisation obtenus est effectuée pour montrer les capacités du nouveau système de mesure.

2 Base théorique

Ce chapitre contient d'abord un aperçu des différents concepts concernant la propagation de la lumière dans un matériau en plus d'explorer les notions de la mécanique quantique pertinentes à ce projet. Ces éléments sont ensuite employés comme fondation afin de déterminer les caractéristiques des matériaux semiconducteurs et pour expliquer la nature de l'effet photovoltaïque.

2.1 Électromagnétisme

2.1.1 Propriétés de l'électron

Pour commencer, on doit définir les caractéristiques de l'électron et déterminer son rôle dans la génération d'un courant électrique. En général, un atome consiste en un noyau composé de protons et de neutrons et accompagné d'un ou plusieurs électrons en orbite. L'électron possède une charge électrique d'une valeur de $-1 e$ (où $1 e = 1.602176634 \times 10^{-19}$ Coulombs) et le proton possède une charge équivalente mais opposée. Tout comme dans le cas d'un aimant, deux particules possédant une charge négative se repoussent et deux particules de charges opposées s'attirent.

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (1)$$

Ce genre d'interaction peut aussi être observé en posant des charges électriques dans un champ électrique externe. En effet, lorsqu'une différence de tension est posée aux bornes d'un fil métallique, un déplacement des électrons vers la borne positive est observable. La force appliquée sur les électrons est nommée *force de Lorentz* (équ. 1) et dépend des caractéristiques du champ électrique \mathbf{E} , du champ magnétique \mathbf{B} et de la vitesse \mathbf{v} de l'électron. Le déplacement d'électrons dans un matériau est plus communément appelé « courant électrique ».

2.1.2 Milieux réfringents et lois de Snell-Descartes

Un dispositif photovoltaïque permet de convertir l'énergie provenant de la lumière en électricité. Puisque la lumière est une onde électromagnétique, une étude de son comportement lorsqu'elle pénètre un matériau permet de mieux comprendre la structure d'une cellule photovoltaïque. Lorsqu'un faisceau de lumière frappe l'interface entre deux milieux transparents, comme l'interface entre l'air et la surface d'un dispositif photovoltaïque, une portion du rayon est réfléchi et l'autre pénètre le matériau (réfraction). La direction du rayon réfléchi et du rayon réfracté dépend de l'angle d'incidence et des indices de réfraction de chaque environnement. Chaque matériau possède un indice de réfraction caractéristique et c'est avec cet indice qu'il est possible de déterminer la vitesse de propagation de la lumière dans le matériau. En effet, un indice de réfraction n représente le ratio entre la vitesse de la lumière dans le vide c et la vitesse de propagation dans un matériau v .

$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

L'indice de réfraction de l'air a une valeur de 1.0003, ce qui est similaire à celui du vide, qui a une valeur de 1, et un matériau comme le silicium a un indice beaucoup plus élevé, soit entre 3.42 et 3.48 (toutes ces valeurs ont été mesurées à partir d'un faisceau lumineux monochromatique avec une longueur d'onde de 589 nm [1]). D'un point de vue purement géométrique, les lois de Snell-Descartes (eq. 3.1 et 3.2) permettent facilement de déterminer la trajectoire du rayon réfléchi et de celui réfracté [2]. L'angle du rayon réfléchi θ_r est identique à l'angle d'incidence θ_i et l'angle du rayon transmis θ_t dépend de l'indice de réfraction de chaque milieu en plus de l'angle d'incidence.

$$\theta_i = \theta_r \quad (3.1)$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (3.2)$$

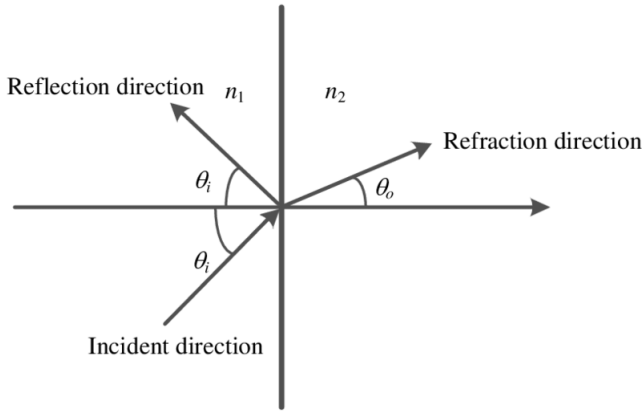


FIGURE 2.1 – Diagramme d'un faisceau lumineux frappant l'interface entre deux milieux avec des indices de réfraction différents. L'angle de réflexion θ_r est le même que l'angle d'incidence θ_i . L'angle de réfraction θ_o dépend des indices de réfraction des milieux, de θ_i et de λ . [3]

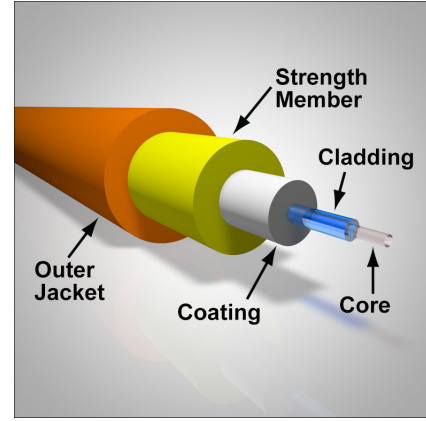


FIGURE 2.2 – Schéma de la structure d'une fibre optique. Le coeur de la fibre a un indice de réfraction supérieur à celui du *cladding*. La fibre est recouverte de couche de support et de protection. [4]

Tous les angles en jeu sont posés en fonction de la normale de la surface, soit le plan perpendiculaire à la surface (fig. 2.1). Dans la situation où l'indice de réfraction du milieu incident est supérieur à celui du milieu réfracté, comme un faisceau dans une fibre optique, il est possible d'obtenir une réflexion totale interne. L'angle d'incidence minimal pour obtenir une réflexion totale est nommé « angle critique » et est calculé à partir de l'équation 4 [2]. L'angle critique θ_c dépend uniquement de l'indice de réfraction de chaque milieu. Une fibre optique est conçue afin d'exploiter le mécanisme de la réflexion totale interne pour transporter des signaux lumineux sur de longues distances en minimisant les pertes d'intensité. Le verre de la fibre est recouvert d'un matériau avec un indice de réfraction inférieur à celui du coeur (fig. 2.2) et, lorsque l'angle d'incidence est inférieur à l'angle critique, le faisceau lumineux est réfléchi à répétition sans être transmis hors de la fibre. Un transport longue distance cause tout de même des pertes par absorption, mais pas par transmission.

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (4)$$

Il est important d'indiquer que l'indice de réfraction d'un milieu dépend de la longueur d'onde de la lumière en propagation et que les lois de Snell-Descartes décrivent le comportement d'un faisceau monochromatique. Un faisceau de lumière blanche, qui contient toutes les longueurs d'onde du visible, est donc séparé en un spectre de rayons monochromatiques réfractés dans des angles différents. La longueur d'onde λ de la lumière bleue ($\lambda \sim 490 \text{ nm}$) est plus courte que celle de la lumière rouge ($\lambda \sim 633 \text{ nm}$) et est redirigée plus intensément vers la normale de la surface (fig. 2.3).

Si la surface est lisse, la réflexion est dite spéculaire et l'angle de réflexion est le même que l'angle d'incidence. Une surface rugueuse a plusieurs « plans normaux » et la lumière est réfléchie dans plusieurs directions résultant en une réflexion diffuse. Certains matériaux peuvent amplifier la portion de rayon diffus en redirigeant la lumière ayant déjà traversé l'interface vers le milieu incident (fig. 2.4).

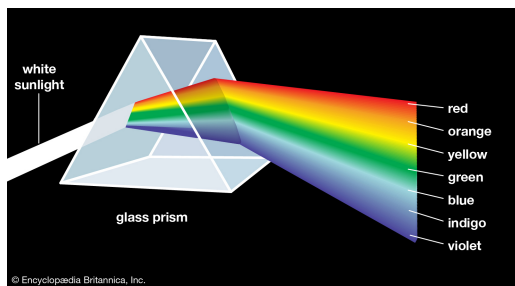


FIGURE 2.3 – Illustration de la dispersion de la lumière blanche dans un milieu transparent. Plus λ est court, plus le rayon réfracté est près de la normale de l'interface.[5]

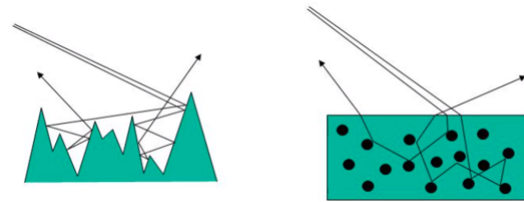


FIGURE 2.4 – Illustration des réflexions diffuses à partir de deux matériaux différents. La surface de gauche est rugueuse et celle de droite redirige les rayons transmis vers la surface.[6]

2.1.3 Équations de Fresnels et atténuation de l'onde électromagnétique

La conception d'un dispositif photovoltaïque doit faire en sorte que le trajet parcouru par la lumière dans le dispositif est maximisé pour laisser la chance aux matériaux semi-conducteurs d'absorber cette lumière. Un autre élément à optimiser est la puissance totale pénétrant le dispositif. Les équations de Fresnel sont utilisées pour déterminer la proportion de la puissance qui est réfléchie et celle qui est transmise. Ces équations dépendent aussi de l'angle d'incidence et de l'indice des réfractions des différents milieux, mais introduisent la notion de la polarisation de la lumière. La lumière se propage dans l'espace sous forme d'ondes électromagnétiques composées de champs électriques et magnétiques oscillants. Les deux champs oscillent sur des plans orthogonaux (fig. 2.5) et c'est le plan du champ électrique qui est conventionnellement utilisé pour décrire la polarisation de la lumière (fig. 2.6).

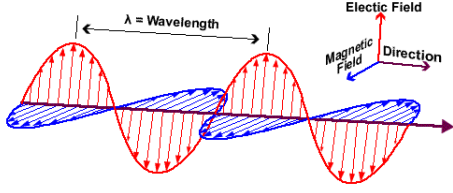


FIGURE 2.5 – La lumière se propage sous forme d’une onde électromagnétique. Le champ électrique oscille sur un plan orthogonal à celui du champ magnétique. Le plan d’oscillation du champ électrique est utilisé comme référence pour décrire la polarisation de la lumière.[7]

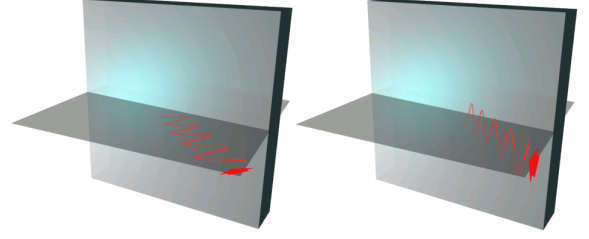


FIGURE 2.6 – Orientation de la composante du champ électrique de la lumière en fonction du plan d’incidence pour la polarisation P et S respectivement.[8]

Les équations de Fresnel permettent d’obtenir les coefficients de réflexion r et de transmission t pour les polarisations S et P. La polarisation S correspond à une onde dont le champ électrique oscille dans le plan perpendiculaire du plan incident et la polarisation P correspond à une oscillation dans le plan parallèle au plan incident. Les équations ci-contre permettent d’obtenir tous les coefficients nécessaires pour calculer la proportion de la puissance totale qui est réfléchiée et celle qui est transmise [2].

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (5.1)$$

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (5.2)$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (5.3)$$

$$t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (5.4)$$

Si la puissance totale du faisceau incident est connue, la transmittance T obtenue avec les équations de Fresnel permet de calculer la puissance totale du faisceau réfléchi directement après l’interface.

$$R = |r|^2 \quad (6.1)$$

$$T = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} |t|^2 \quad (6.2)$$

Ensuite, le faisceau réfracté est graduellement absorbé par le matériau au fur et à mesure qu’il se propage. L’intensité du faisceau diminue exponentiellement avec la distance parcourue selon un coefficient d’absorption. Chaque matériau a un coefficient d’absorption caractéristique qui dépend à son tour de la longueur d’onde de la lumière en propagation. La loi de Beer-Lambert (eq. 7) est utilisée pour déterminer l’intensité de la lumière à une certaine distance de l’interface et ainsi connaître la proportion du faisceau absorbée pouvant

participer à la génération de courant. I_0 représente l'intensité initiale du signal à l'entrée du matériau et $\alpha(\lambda)$ est le coefficient d'absorption du matériau en fonction de la longueur d'onde de la lumière. Finalement, la variable t représente la distance parcourue à partir de l'interface.

$$I(x,y) = I_0 \exp [\alpha(\lambda)t] \quad (7)$$

Par exemple, une cellule photovoltaïque à base de GaAs est spécialisée dans la conversion de la lumière infrarouge (850 nm) en électricité et a un coefficient d'absorption d'environ 10^{-4}cm^{-1} à cette longueur d'onde. Après avoir parcouru une distance de $1 \mu\text{m}$ dans le matériau, 36.8% de l'intensité du faisceau incident (à 850 nm) est absorbée. En reprenant l'exemple de la fibre optique, les pertes de signal causées par l'absorption dans les matériaux dépend aussi de la longueur d'onde de la lumière en propagation comme le montre la figure 2.7.

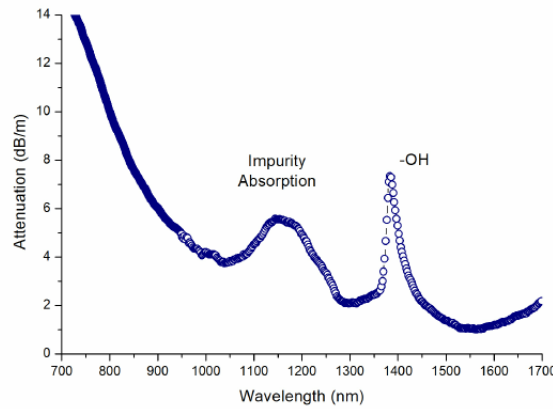


FIGURE 2.7 – Graphique du taux d'atténuation de la lumière dans une fibre optique en fonction de la longueur d'onde. Le premier pic d'absorption indique la présence d'impuretés dans le verre et le deuxième pic correspond à l'absorption à $\lambda = 1385 \text{nm}$ des ions -OH . La largeur des pics peut être affectée par une source d'énergie externe tel que la présence de chaleur.[9]

2.1.4 Interférence constructive et destructive entre deux ondes électromagnétiques

Lorsque plusieurs réflexions se produisent à l'interface et à l'intérieur d'un matériau, il arrive que plusieurs rayons lumineux soient amenés à interagir de manière cohérente entre eux. C'est à ce moment que les phénomènes d'interférence constructive et destructive peuvent se manifester. En superposant deux faisceaux lumineux dans l'espace, les oscillations du champ électrique et du champ magnétique de chaque onde se combinent pour former une seule onde apparente. Pour décrire l'interaction entre les deux ondes électromagnétiques, il faut définir ce qu'est la phase. En considérant que les oscillations du champ électrique et magnétique sont périodiques, c'est à dire que les oscillations se répètent à un intervalle de temps régulier, la phase représente la fraction d'une oscillation. Conventionnellement, les maximums et les minimums d'une onde correspondent respectivement aux phases $\frac{\pi}{2}$ et $\frac{-\pi}{2}$ et une rotation

complète est représentée par un changement de phase de 2π . En superposant deux ondes électromagnétiques avec la même phase dans l'espace, les maximums et les minimums de chaque onde se retrouvent exactement au même endroit. L'onde résultante a une amplitude équivalente à l'addition des amplitudes des deux ondes initiales et ce genre d'interférence est dite "constructive" (fig. 2.8). Dans le cas de deux ondes avec des phases opposées, les maximums d'une sont positionnés au même endroit que les minimums de l'autre et vice-versa. L'onde résultante a une amplitude nulle et ce type d'interférence est dénommée "destructive". Il est important de noter que l'énergie transportée par les ondes ne disparaît pas lors de l'interférence destructive et ne double pas dans le cas d'interférence constructive, elle ne fait que changer de forme.

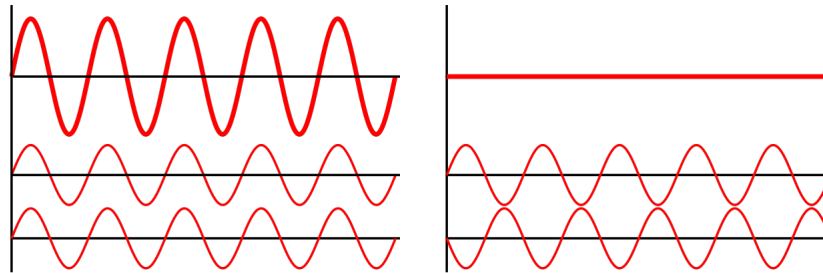


FIGURE 2.8 – Représentation graphique d'interférence constructive et destructive respectivement. L'onde du haut correspond à la combinaison des deux ondes du bas.[10]

2.2 Mécanique quantique

Afin de bien comprendre les mécanismes permettant de convertir l'énergie provenant du Soleil en énergie électrique utilisable, il faut également s'intéresser aux bases de la mécanique quantique. Cet aspect de la physique comporte des concepts qui sont souvent difficiles à expliquer sans un support mathématique détaillé. Une partie de cette complexité provient de la nature des concepts à l'étude, soit la physique à l'échelle atomique, en plus de l'introduction de phénomènes exotiques tels que la superposition d'état et la dualité onde-corpuscule. Il est toutefois possible d'utiliser une approche plus empirique pour comprendre les processus en jeu dans la conversion de l'énergie lumineuse en électricité. La prochaine section porte sur les différents concepts concernant le fonctionnement et la fabrication des dispositifs photovoltaïques.

2.2.1 Dualité onde-corpuscule

Un des concepts clés de la mécanique quantique nécessaires à la compréhension de l'effet photovoltaïque est la dualité onde-corpuscule. Celui-ci indique qu'il est possible de décrire une particule physique comme une onde dans l'espace et vice-versa. En effet, il est possible de concevoir certaines expériences qui révèlent qu'un électron peut se comporter comme une particule ou comme une onde. Par exemple, dans un écran cathodique, les électrons se comportent comme des particules. Chaque fois qu'un électron est projeté du tube cathodique pour aller frapper la surface phosphorescente, un « éclat » lumineux est observable (fig. 2.9). Avec une instrumentation assez précise, il est possible d'envoyer les électrons les uns à la

suite de l'autre, permettant de voir que chaque électron produit un seul éclat. Par contre, l'expérience des fentes de Young témoigne d'un tout autre comportement. Cette dernière consiste à envoyer de la lumière à travers deux fentes voisines pour étudier le motif créé de l'autre côté des fentes. Une fente de largeur similaire à la longueur d'onde de la lumière incidente déforme les "fronts d'onde" et les faisceaux sont diffractés dans toutes les directions. En posant les deux fentes près l'une de l'autre, les fronts d'onde provenant de chaque fente peuvent subir de l'interférence et créer un motif particulier sur la cible (fig. 2.10).

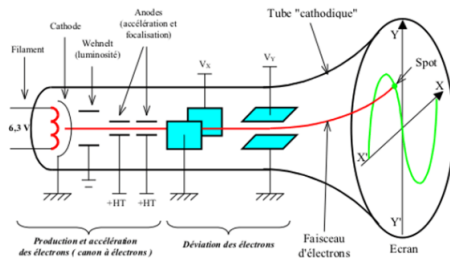


FIGURE 2.9 – Schéma d'un tube cathodique composé d'un canon à électrons, un tube sous-vide et de quelques électrodes. Les électrons sont extraits du filament à partir d'électrodes pour ensuite former un faisceau de particules accélérées grâce à une grille métallique (Wehnelt). Des électrodes sont utilisées pour orienter les électrons avant l'impact avec l'écran phosphorescent.[11]

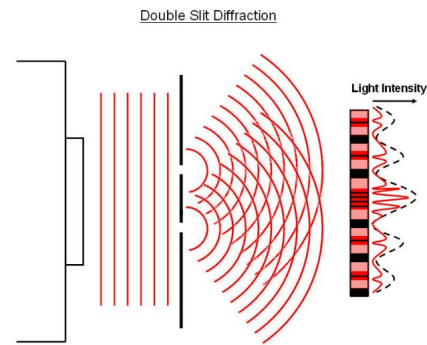


FIGURE 2.10 – Une fente de largeur similaire à celle de la longueur d'onde de lumière incidente agit comme une nouvelle source radiale. Un front d'onde plat est transformé en front d'onde circulaire.[12]

Généralement, l'interférence (section 2.1.4) entre la lumière provenant de chaque fente forme un motif particulier sur la cible. Lorsque la même expérience est effectuée en remplaçant la source lumineuse par un « canon à électrons » pouvant projeter un électron à la fois, un motif d'interférence semblable est observable sur la cible (fig. 2.11). Pourtant, si les électrons étaient simplement des particules, ils traverseraient au hasard une des deux fentes sans discrimination et le motif résultant serait formé de deux taches. Le motif d'interférence (fig. 2.12) créé par le faisceau d'électrons peut être décrit en utilisant les équations typiquement utilisées pour décrire une onde dans l'espace, mais pas en utilisant les équations classiques des particules en mouvement. De plus, le patron d'interférence indique que les électrons subissent une diffraction après avoir passé les fentes tout comme l'aurait fait une onde lumineuse. Cela signifie que, selon la situation, un électron peut se comporter comme une particule ou une onde.

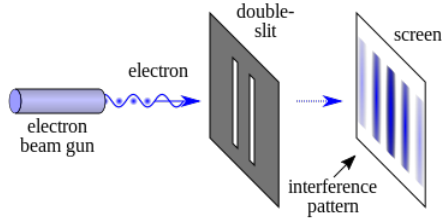


FIGURE 2.11 – Schéma de l'expérience des fentes de Young avec des électrons. Le canon à électrons projette les électrons les uns à la suite des autres vers un obstacle avec deux fentes. Le patron d'interférence observable sur l'écran indique que les électrons ont un comportement ondulatoire.[13]

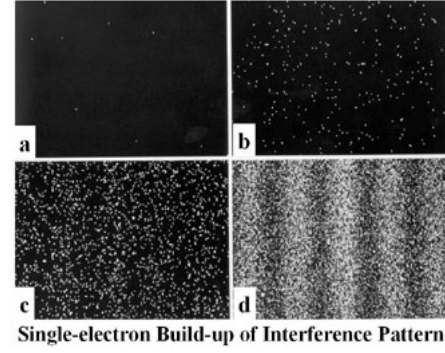


FIGURE 2.12 – Patron d'interférence obtenu après avoir envoyé une série d'électrons à travers deux fentes minces. La fonction d'onde d'un électron peut interférer avec elle-même lorsqu'elle est diffractée par les fentes. [14]

Un des mécanismes présents dans un dispositif photovoltaïque moderne exploitant la caractéristique ondulatoire de l'électron est celui de l'effet tunnel. Ce phénomène se produit lorsqu'un électron frappe une barrière de potentiel tellement mince que l'électron a une probabilité non-nulle de se retrouver de l'autre côté. Une collision avec une barrière de potentiel est équivalente à une onde frappant une interface (fig. 2.13). La probabilité de retrouver un électron à un endroit donné est décrite par une fonction d'onde avec une certaine amplitude. Cette amplitude s'atténue au fur et à mesure que l'onde se "propage" dans la barrière de potentiel suivant une décroissance exponentielle. Si la barrière est assez mince, une portion de l'onde peut se retrouver de l'autre côté de la barrière, indiquant qu'il y a une probabilité non-nulle que l'électron se retrouve de l'autre côté avec toute son énergie initiale. Ce processus est presque instantané et un courant d'électrons qui traverse une barrière de potentiel ne subit pas de pertes par résistance.

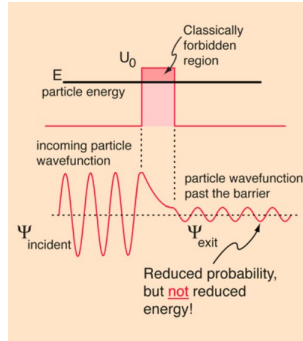


FIGURE 2.13 – L'amplitude de la fonction d'onde d'un électron est atténuée au fur et à mesure qu'elle se propage dans une barrière de potentiel. Une barrière assez mince n'atténue pas complètement la fonction d'onde et un électron peut se retrouver de l'autre côté.[15]

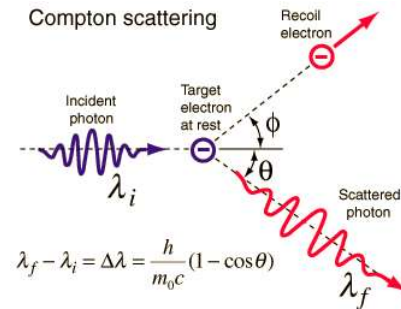


FIGURE 2.14 – Lorsqu'un photon entre en collision avec un électron immobile, l'électron est projeté comme s'il avait subi une collision. La valeur de l'énergie cinétique de l'électron après la collision correspond à la perte d'énergie du photon.[16]

Le concept de dualité onde-corpuscule s'applique aussi pour la lumière, qui peut également se comporter comme une particule. Un rayon lumineux peut être décrit comme un amas de petits paquets d'énergie nommés « photons ». Un des phénomènes solidifiant cette idée est celui de l'effet Compton. Selon la mécanique classique, une collision est dite « élastique » lorsque l'énergie cinétique et la quantité de mouvement d'un système de particules sont les mêmes avant et après l'impact. Lorsqu'un photon suivant une trajectoire linéaire avec une certaine quantité d'énergie entre en collision avec un électron immobile, les deux particules sont propulsées dans deux directions différentes en conservant l'énergie cinétique et la quantité de mouvement du système (fig. 2.14). L'électron gagne de l'énergie sous forme d'énergie cinétique et le photon subit une perte d'énergie qui se manifeste par une augmentation de sa longueur d'onde. La dépendance en longueur d'onde de l'énergie d'un photon est décrite par l'équation 8 où h correspond à la constante de Planck. C'est l'aspect corpusculaire de la lumière qui rend l'effet Compton possible.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (8)$$

2.2.2 Quantification de l'énergie

Le dernier concept de la mécanique quantique pertinent est celui de la quantification de l'énergie. Pour être plus précis, c'est la notion que les électrons en orbites dans un atome ne peuvent pas contenir n'importe quelle valeur d'énergie. En effet, les électrons sont positionnés sur des orbitales d'énergie précises autour du noyau et il est impossible pour un électron d'être stable avec une énergie autre que celle des orbitales (fig. 2.15). Chaque électron sur une orbite donnée possède la même quantité d'énergie et chaque orbitale possède une « forme » distincte. Afin de minimiser son énergie, les électrons sont généralement positionnés pour remplir les orbitales de plus basse énergie et lorsque la capacité maximale de l'orbitale est atteinte, l'orbitale voisine est occupée. Si un électron gagne une quantité d'énergie égale ou supérieure à l'énergie séparant son orbitale de l'orbitale voisine, il a la capacité de changer d'orbitale temporairement. Ce genre d'excitation peut être causé par un photon incident avec une énergie appropriée et si la stimulation n'est pas maintenue, l'électron retourne sur une orbitale moins énergétique en émettant son énergie excédentaire sous forme de photon. La spectroscopie par émission est une technique disponible pour mesurer la valeur d'énergie pour chaque orbitale. En excitant un atome et en mesurant l'intensité de la lumière émise en fonction de sa longueur d'onde, un spectre d'absorption peut être obtenu où chaque raie représente une transition électronique d'orbitale à orbitale (fig. 2.16). Bien que le modèle atomique de Bohr permette de facilement illustrer une transition électronique, il implique qu'il y a un mouvement des électrons dans l'espace. En réalité, les transitions se font au niveau de l'énergie : les électrons n'ont pas le même état quantique avant et après la transition.

convertir l'énergie provenant des photons en électricité exploitable. Le concept de bande électronique apparaît lorsqu'une grande quantité d'atomes sont près les uns des autres, comme dans un cristal. Chaque électron possède panoplie de caractéristiques physiques, comme une charge électrique et une masse, mais peut aussi être décrit par ses nombres quantiques. Les nombres quantiques permettent de définir précisément l'état quantique d'une particule. Ces nombres jouent un rôle important dans la répartition des électrons dans un système polyatomique. En effet, un des postulats de la mécanique quantique, le principe d'exclusion de Pauli, indique que deux électrons ne peuvent pas être dans le même état quantique en même temps. Lorsque deux atomes identiques sont assez rapprochés, leurs orbitales électroniques se chevauchent et les électrons de même énergie sont poussés à coexister dans le même espace. C'est à ce point que l'on voit une séparation des niveaux énergétiques du système (fig. 2.17).

Chaque orbitale modifie légèrement son énergie de manière à éviter tout recouvrement et ainsi permettre aux électrons de coexister dans le système. Lorsque le nombre d'atome dans le système est assez élevé, la séparation énergétique entre les orbitales équivalentes (toutes les orbitales qui avaient la même énergie avant d'entrer dans le système) est presque indiscernable, ce qui forme une « bande électronique ». La structure électronique d'un système polyatomique reste tout de même semblable à celui d'un atome seul : les bandes électroniques sont séparées par des bandes d'énergie « interdites » inaccessibles aux électrons.

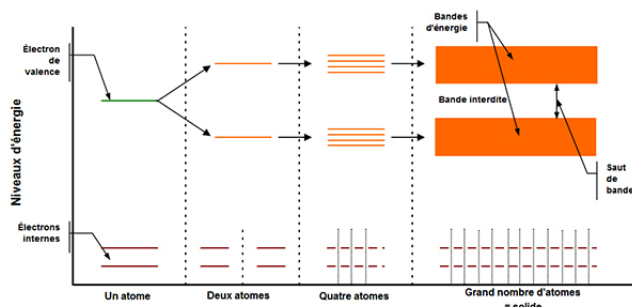


FIGURE 2.17 – Diagramme de la création de bandes d'énergie suite à la séparation des niveaux d'énergie dans un système polyatomique. Selon le principe de Pauli, deux électrons ne peuvent pas être dans le même état en même temps et les niveaux d'énergies des atomes voisins sont modifiés pour former des bandes d'énergie.[19]

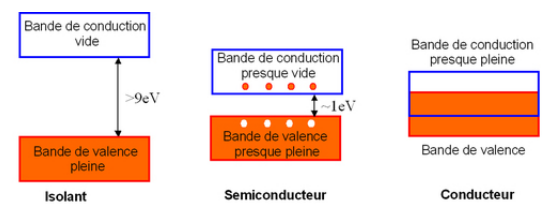


FIGURE 2.18 – Structure de bande d'un métal, d'un isolant et d'un semiconducteur. Un métal ne possède pas de bande interdite et conduit facilement l'électricité. La bande interdite d'un isolant est trop large pour conduire l'électricité efficacement tandis qu'un semiconducteur n'a pas besoin d'autant d'énergie d'un isolant pour conduire un courant.[20]

Ce modèle permet facilement de décrire la capacité à conduire l'électricité pour un matériau donné (fig. 2.18). Dans un métal, la bande de conduction (la bande électronique la plus énergétique contenant des électrons) n'est pas complètement remplie, ce qui permet aux électrons excités de changer d'orbitale sans traverser de bandes interdites. L'énergie thermique dans un métal à température pièce est largement suffisante pour qu'il y ait une abondance d'électrons libres capable de peupler la bande de conduction. Dans un isolant et un semiconducteur, toutes les bandes électroniques sont remplies et les électrons ont besoin d'une énergie additionnelle supérieure à l'énergie de la bande interdite pour sauter dans la bande de conduction. La différence entre un isolant et un semiconducteur se trouve dans l'énergie de leurs bandes interdites respectives. Dans un isolant, l'énergie de la bande inter-

dite est tellement grande que la combinaison de l'énergie thermique et de l'énergie lumineuse n'est pas suffisante. Cependant, dans un semiconducteur, l'énergie de la bande interdite est semblable à l'énergie des photons émis par le Soleil. C'est grâce à cette caractéristique qu'il est possible de fabriquer des panneaux solaires.

2.3.2 Jonction p/n et dopage

Un des mécanisme en jeu dans la création d'un courant dans un dispositif photovoltaïque est l'utilisation de jonctions p/n permettant d'imposer une direction de propagation aux électrons excités. Une jonction p/n est formée lorsque deux matériaux, type-p et type-n, avec des configurations électroniques différentes, sont mis en contact. Un matériau de type-n a une surface couverte d'atomes avec des électrons à donner tandis qu'un matériau de type-p a une surface en manque d'électrons. Afin de minimiser leur énergie, chaque atome fait en sorte que sa dernière orbitale soit complètement remplie d'électrons. S'il manque un électron pour remplir l'orbitale de valence d'un atome, il pourra former un lien avec un autre atome dont l'orbitale de valence ne contient qu'un électron. La mise en contact de ces matériaux fait en sorte que les atomes de chaque surface sont assez près pour qu'ils puissent interagir entre eux.

Le choix du matériau utilisé dans la fabrication d'un dispositif photovoltaïque dépend de la longueur d'onde des photons à absorber. Cela impose souvent qu'une jonction p/n soit composée de deux couches du même matériau semiconducteur. Par contre, une jonction p/n ne peut pas fonctionner si chaque côté de l'interface a le même besoin en électrons. Pour remédier à la situation, des atomes peuvent être ajoutés à la structure du matériau pour modifier sa configuration électronique à la surface. Le processus d'introduction d'impuretés dans un matériau est nommé "dopage". En prenant l'exemple d'un cristal de silicium dont chaque atome a une orbitale de valence demie remplie, un dopage de type-n pourrait introduire des atomes d'arsenic (donneurs d'électrons) et un dopage de type-p pourrait incorporer des atomes de bore (accepteurs d'électrons).

2.3.3 Niveau de Fermi et zone de déplétion

Du point de vue énergétique, l'introduction d'impuretés dans un matériau a comme effet de modifier l'énergie des bandes de conduction et de valence et de modifier leur position relative au niveau de Fermi. La distribution de Fermi-Dirac (éq. 9) est utilisé pour décrire la probabilité qu'un niveau d'énergie E soit occupé par un électron. L'équation contient la constante de Boltzmann k_B , le niveau de Fermi E_F et la température T du système. Le niveau de Fermi correspond au niveau énergétique théorique avec 50% de chance d'être occupé par un électron (fig. 2.19).

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1} \quad (9)$$

À zéro kelvin, tous les électrons d'un matériau occupent des niveaux d'énergie inférieurs ou égal à celui du niveau de Fermi. La probabilité qu'un électron occupe un niveau d'énergie supérieur au niveau de Fermi augmente avec la température.

Un métal a un niveau de Fermi situé à l'intérieur de la bande conduction, ce qui indique qu'il y a toujours des états disponibles pour que les électrons puissent se diffuser. Un semi-conducteur et un isolant pur ont une bande de valence complètement remplie et une bande de conduction vide, situant le niveau de Fermi au milieu de la bande interdite. Un dopage de type-p augmente le nombre d'états disponibles dans la bande de valence et le niveau de Fermi se retrouve plus près de la bande de valence. Un dopage de type-n introduit des électrons additionnels dans le système, augmentant la probabilité d'en retrouver dans la bande de conduction, positionnant le niveau de Fermi plus près de la bande de conduction.

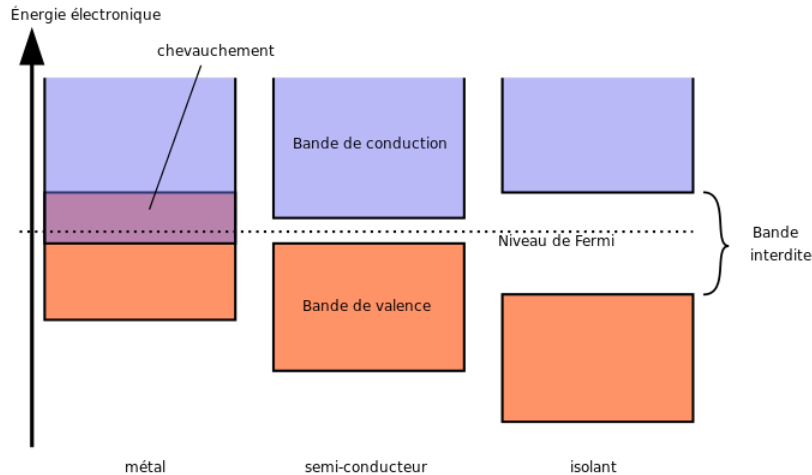


FIGURE 2.19 – Représentation du niveau de Fermi dans un métal, un isolant et un semi-conducteur. Puisque la bande de valence d'un isolant et d'un semi-conducteur est pleine et que la bande de conduction est vide, le niveau de Fermi est positionné au milieu de la bande interdite. Dans le cas d'un métal, le niveau de Fermi se trouve dans la bande de valence, ce qui indique qu'il y a toujours des états plus énergétiques disponibles pour conduire l'électricité.[21]

Lorsque les deux types de matériau sont mis en contact, leurs structures de bandes sont modifiées à l'interface de manière à éviter toute discontinuité des niveaux d'énergies (fig. 2.20). La déformation des bandes d'énergie fait en sorte que le niveau de Fermi reste constant de chaque côté de l'interface. Puisque les bandes d'énergie du matériau de type-p ont une énergie supérieure à celle du matériau de type-n, les électrons des atomes donneurs peuvent être diffusés vers les orbitales incomplètes des atomes receveurs pour minimiser leur énergie. La structure de bande à l'interface d'un tel système est nommée "zone de déplétion" parce que les matériaux sont appauvris de leurs porteurs de charge majoritaires. Au fur et à mesure que les électrons de valence des atomes donneurs atteignent les atomes receveurs de l'autre côté de l'interface, la surface du matériau de type-p gagne une charge négative tandis que celle du matériau de type-n gagne une charge positive. Un champ électrique s'opposant au mouvement des électrons dans la jonction se développe graduellement à l'interface jusqu'à ce qu'il empêche complètement le courant de circuler (fig. 2.21).

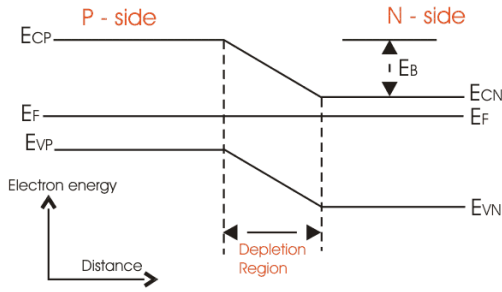


FIGURE 2.20 – Diagramme de la zone de déplétion à l'interface de la jonction p/n. À l'équilibre, le niveau de Fermi de chaque côté de l'interface est constant et la structure de bande est modifiée de manière à éviter toute discontinuité.[22]

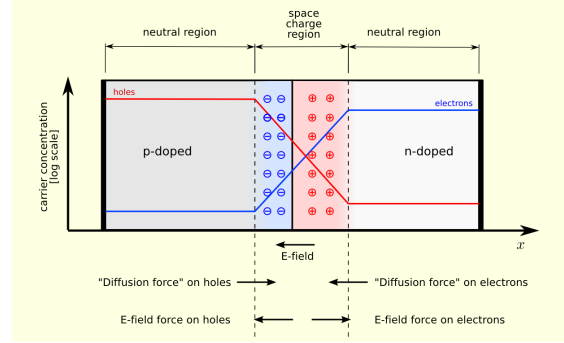


FIGURE 2.21 – Diagramme de la distribution des porteurs de charge dans la zone de déplétion d'une jonction p/n. La perte de porteurs accorde une charge électrique aux matériaux à proximité et un champ électrique apparaît à l'interface.[23]

Pour bien comprendre le comportement des électrons dans une jonction p/n, il faut introduire le concept des paires électrons-trous. Après avoir été excité par un photon, un électron dans la bande de valence se dirigera vers la bande de conduction, laissant derrière lui un "trou". Ce trou peut être représenté comme une quasi-particule de charge égale et opposée à celle de l'électron. Durant la relaxation, un électron se positionne dans le trou le plus proche, celui demandant le moins d'énergie à accéder. Par contre, dans la zone de déplétion, les électrons dans la bande de conduction du matériau de type-p peuvent réduire leur énergie circulant vers la bande de conduction du matériau de type-n sans nécessairement se recombiner avec un trou. Suivant la même logique, les trous dans la bande de valence de type-n peuvent se déplacer vers la bande de valence du matériau de type-p. La zone de déplétion permet donc d'induire temporairement un courant à travers l'interface jusqu'à ce que la différence de potentiel de chaque côté de la jonction soit trop élevée.

Les électrons et les trous participant à ce courant sont décrits comme étant des porteurs de charge majoritaires. Par exemple, dans un matériau de type-n, les électrons en surplus jouent le rôle de porteurs de charge majoritaires tandis que les trous représentent les porteurs de charge minoritaires. Bien que la quantité d'impuretés ne varie pas durant le processus de dopage, la concentration de porteurs de charge dépend de la température. En effet, la probabilité qu'un électron occupe un niveau d'énergie supérieur au niveau de Fermi, ce qui implique qu'un électron quitte la bande de valence pour finir dans la bande de conduction, augmente avec la température (eq. 8). Cela signifie que la quantité de paires électron-trou augmente avec température. À l'équilibre thermique, le taux de génération de paires électrons-trous est égal à celui du taux de recombinaison et la concentration de porteurs de charge reste constant.

En appliquant une différence de potentiel entre le matériau de type-p et celui de type-n, un champ électrique apparaît dans le volume du matériau. En polarisation directe, le matériau de type-p est connecté à la borne négative et vice-versa et le champ électrique induit vient s'opposer au champ électrique déjà présent dans la jonction. Ceci permet à la jonction de

continuer le processus de transfert en ayant un approvisionnement constant d'électrons du côté n et une abondance de trous du côté p. Les électrons excités sont accélérés par le champ électrique et peuvent parcourir une certaine distance dans la bande de conduction avant de se recombiner avec les trous les plus proches. Un mouvement similaire est observable dans la bande de valence où les trous avec une charge électrique positive se dirigent vers la borne négative. Leur mouvement apparent peut être expliqué par le mouvement des électrons dans la bande de valence. La génération d'une paire électron-trou signifie que l'orbitale de valence d'un atome est soudainement en manque d'électron. Les atomes plus près de la borne négative peuvent donc partager leurs électrons de valence pour combler le trou et réduire l'énergie totale du système. Chaque fois qu'un électron passe d'une orbitale à un autre, il laisse derrière lui un trou et le processus se répète jusqu'à ce que le trou atteigne la borne négative.

2.3.4 Cellule multi-jonction et jonction tunnel

Une méthode employée pour étendre le spectre d'absorption d'un dispositif est l'empilement de plusieurs jonctions p/n faites à partir de matériaux semiconducteurs différents (fig. 2.22). Chaque couche de semiconducteur peut donc absorber une portion différente du spectre de longueur d'onde de la lumière incidente, améliorant le rendement total du dispositif.

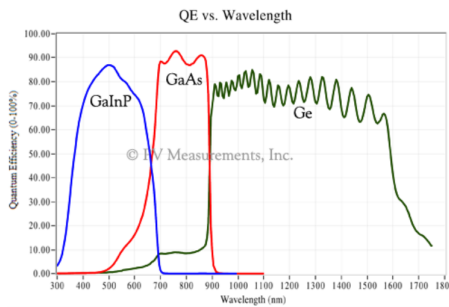


FIGURE 2.22 – Une cellule photovoltaïque multi-jonction est composée de jonctions fabriquées avec des matériaux semiconducteurs différents. Chaque couche convertie une portion différente du spectre d'émission du Soleil, permettant d'augmenter l'efficacité totale du dispositif.[24]

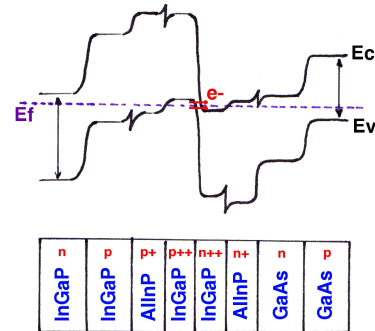


FIGURE 2.23 – Structure de bande à l'interface d'une jonction tunnel. Le dopage très élevé fait en sorte que la barrière de potentiel entre le côté P++ et N++ est assez minces pour faire passer des électrons par effet tunnel. [25]

Cela implique qu'il faut pouvoir faire passer les électrons d'une jonction p/n à une autre en essayant de minimiser les pertes. Les pertes par résistance dans une couche métallique sont dissipées sous forme de chaleur qui diminue l'efficacité totale du dispositif. Par contre, il est possible d'exploiter les caractéristiques d'une jonction p/n pour transporter les électrons d'un matériau à un autre sans perte. Une "jonction tunnel" est une jonction p/n où chaque matériau possède une très grande concentration de dopants. En incorporant assez d'atomes donneurs à un matériau semiconducteur, il est possible de positionner le niveau de Fermi dans la bande de conduction. Une concentration élevée d'atomes receveurs peut positionner le niveau de Fermi dans la bande de valence. La zone de déplétion d'une jonction p/n composée

de tels matériaux est tellement abrupte que les électrons dans la bande de valence du côté p peuvent peupler la bande de conduction du côté n par effet tunnel. Une structure telle qu'illustré dans la figure 2.23 permet donc aux électrons générés dans la jonction p/n à base de InGaP de traverser la jonction tunnel pour atteindre l'autre jonction p/n formée de GaAs et ainsi contribuer au courant. Un tel empilement de jonctions a comme résultat d'additionner les potentiels électriques de chaque cellule et ainsi permettre à un dispositif d'alimenter des appareils électroniques à plus haute tension. Selon les lois de Kirchhoff pour un circuit électrique simple, le courant doit être constant dans tout le volume du dispositif, ce qui implique que la jonction générant le courant le plus faible limite les performances totales du dispositif.

3 État de l'art

3.1 Structure des dispositifs photovoltaïques

L'étude des concepts physiques concernant les dispositifs photovoltaïques permet de comprendre les choix effectués durant leur conception. En effet, le travail d'optimisation durant la fabrication d'une cellule aide à tirer profit des caractéristiques des matériaux semiconducteurs en plus d'augmenter l'efficacité du circuit électrique global. Ce chapitre portera sur la structure des différents types de dispositifs photovoltaïques et adressera également les justifications derrière les décisions prises durant la conception. L'étude de la structure d'une cellule photovoltaïque à simple jonction couvre tous les éléments essentiels au bon fonctionnement du système. Les structures des cellules multi-jonctions et des convertisseurs de puissance seront ensuite explorés pour définir leurs particularités.

3.1.1 Structure d'une cellule simple jonction

La jonction p/n formant le corps d'une cellule simple contient deux couches de matériaux semiconducteurs avec des épaisseurs différentes. Pour les cellules de type n-sur-p, la couche de matériau de type-n est généralement beaucoup plus mince que celle du matériau de type-p pour encourager le transfert des porteurs de charge à travers la zone de déplétion. La couche de matériau de type-n est considérée comme étant la couche "émettrice" tandis que la couche plus épaisse de matériau de type-p correspond à la couche "absorbante" (fig. 3.1). Puisque l'intensité de la lumière incidente diminue exponentiellement avec la distance parcourue dans le matériau, la majorité des paires électrons-trous sont générées plus près de la surface du matériau. Les électrons et les trous à proximité de la zone de déplétion peuvent ensuite diffuser de l'autre côté de l'interface et participer au courant. De manière générale, la mobilité des trous est inférieure à celle des électrons, ce qui implique que la distance de diffusion des trous est aussi inférieure à celle des électrons. Idéalement, l'interface de la jonction est plus près de la surface de la cellule que la distance de diffusion des trous, de manière à éviter que les trous se recombinent avant d'atteindre la jonction. Les électrons excités dans le matériau de type-n sont assez proches de la borne positive pour être récoltés. La couche absorbante est plus épaisse afin d'optimiser la quantité de photons absorbés. De plus, puisque la longueur de diffusion des électrons est supérieure à celle des trous, les électrons excités par les photons absorbés ont plus de chances d'atteindre la zone de déplétion avant de se recombiner. Tout comme pour la couche émettrice, la génération de paires électrons-trous est maximale près de la surface de la couche c'est-à-dire près de la zone de déplétion.

Afin de récolter les porteurs de charges créés durant la génération de paires électrons-trous, des contacts métalliques sont posés au dessus et en dessous de la jonction p/n (fig. 3.2). Le contact *arrière* est composé d'une couche métallique couvrant complètement la surface sous la cellule. Les trous sont donc récoltés sur toute la surface sous le matériau de type-p et de nouveaux électrons sont injectés dans le système. Il faut noter qu'il existe plusieurs autres configurations de cellules photovoltaïque, mais celle décrite plus haut est plus couramment utilisée et est plus pertinente à ce projet.

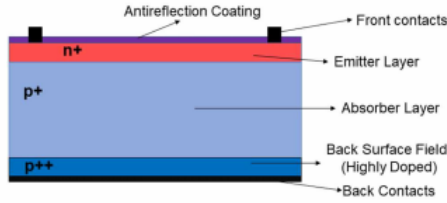


FIGURE 3.1 – Vue en coupe d’une cellule solaire simple jonction.[26]

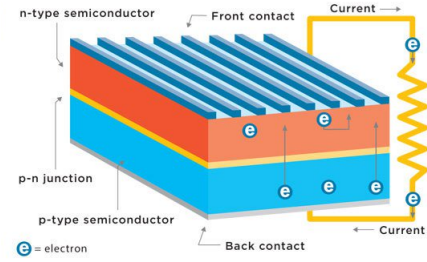


FIGURE 3.2 – Vue de côté d’une cellule photovoltaïque avec ses contacts métalliques. Les électrons circulent du bas de la cellule vers le haut pour ensuite entrer dans le circuit électrique.[27]

Le contact *avant* ne peut pas recouvrir la totalité de la surface au dessus de la cellule parce que la lumière doit pouvoir atteindre le matériau semiconducteur pour créer des paires électrons-trous. C’est pourquoi la surface du matériau de type-n est habituellement recouverte d’un grillage métallique. Une série de *doigts métalliques* parallèles sont posés à la surface avec des *bus bar* reliant l’extrémité de chaque ligne métallique (fig. 3.3). Les *bus bars* jouent le rôle de bornes électriques permettant de connecter un appareil électronique à alimenter ou à connecter plusieurs cellules en séries et ainsi augmenter la puissance totale générée par le système. Les électrons excités à la surface de la cellule diffusent dans des directions aléatoires jusqu’à ce qu’ils atteignent un des doigts métalliques. Ensuite, les électrons circulent dans les lignes métalliques pour finalement aboutir dans les *bus bars*. Le travail d’optimisation nécessaire concerne la région couverte par le réseau de *gridlines*. L’augmentation de la surface couverte par les doigts métalliques cause un effet d’ombrage plus important dans la cellule. Cette réduction de l’intensité lumineuse incidente signifie qu’il n’y a pas autant de paires électrons-trous générées dans la cellule. Par contre, le trajet parcouru par les électrons pour atteindre les *gridlines* est raccourci et les pertes par résistances sont réduites parce que la résistance dans les connexions métalliques est inférieure à celle du matériau semiconducteur.

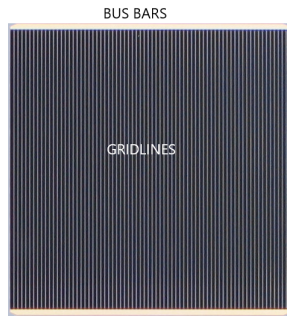


FIGURE 3.3 – Surface d’une cellule photovoltaïque recouverte de gridlines. Les doigts métalliques parallèles acheminent les électrons vers les bus bars.[28]

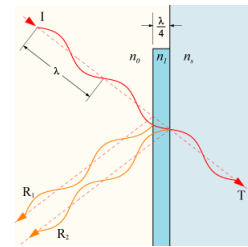


FIGURE 3.4 – Schéma des réflexions de la lumière au contact d’une couche antireflet. Une épaisseur équivalente à un quart de la longueur d’onde fait en sorte que les rayons réfléchis subissent de l’interférence destructive.[29]

En addition aux *gridlines*, la surface d'une cellule est généralement couverte d'une couche antireflet et d'une couche de protection (fig. 3.1). La couche antireflet est composée d'un film de matériau diélectrique laissant passer la lumière incidente. Chaque fois qu'un faisceau lumineux frappe une interface entre deux matériaux d'indices de réfraction différents avec un angle d'incidence inférieur à l'angle critique, une portion de l'intensité total est réfléchi et l'autre portion est transmise (section 2.1.2). En posant une couche antireflet avec une épaisseur correspondant au quart de la longueur d'onde de la lumière incidente, il est possible d'empêcher la lumière de réfléchir hors du système (fig. 3.4). Le faisceau réfléchi à la surface de la couche antireflet se trouve à avoir une phase complètement opposée à celle du rayon réfléchi à l'interface entre la couche antireflet et le matériau semiconducteur. L'interférence entre les deux faisceaux est de nature destructive et presque aucune lumière n'est réfléchi hors du système (section 2.1.4). Cela a comme effet d'augmenter la proportion totale du faisceau qui est transmise dans le semiconducteur et ainsi d'augmenter le rendement du dispositif. Dans certaines configurations, une couche de protection en verre est parfois utilisée par dessus la couche antireflet simplement pour éviter que la surface soit endommagée par l'environnement.

Une méthode utilisée pour réduire le taux de recombinaison des porteurs de charge à l'arrière d'une cellule est d'ajouter une couche de matériau de type-p avec un dopage supérieur à celui de la couche absorbante (fig. 3.1). La jonction entre la couche très dopée (*Back Surface Field*) et la couche absorbante a un comportement similaire à une jonction p/n et un champ électrique apparaît à l'interface. Ce champ s'oppose à la diffusion des porteurs de charge minoritaires vers le contact métallique, ce qui empêche les électrons de se recombiner près du contact arrière.

3.1.2 Structure des cellules multi-jonction

Comme mentionné dans la section 2.3.4, l'empilement de jonctions p/n permet non seulement d'augmenter la tension générée aux bornes du dispositif mais aussi d'élargir le spectre d'absorption de la cellule. Une cellule multi-jonction à concentration profite des avantages décrits plus haut pour offrir des rendements supérieurs aux dispositifs à simple jonction. Un exemple de structure pour un tel dispositif est schématisé dans la figure 3.5. Chaque couche est composée de matériaux avec des bandes interdites d'énergie différentes pour absorber une plus grande portion du spectre d'émission du Soleil. Le matériau de la jonction du dessus possède la bande interdite d'énergie la plus large de la cellule tandis que celle du dessous possède la bande interdite la moins énergétique. Cette configuration fait en sorte que la lumière atteint facilement chaque jonction afin d'augmenter les chances de générer des paires électrons-trous. Les photons moins énergétiques ne peuvent pas exciter les électrons de la jonction du dessus et continuent leur chemin vers les jonctions du dessous pour être absorbés. De plus, le taux d'absorption d'un matériau est habituellement plus élevé pour la lumière de courte longueur d'onde (section 2.1.3). Il est donc plus difficile pour les photons de haute énergie d'atteindre les jonctions au bas de la cellule. Les jonctions tunnel (section 2.3.4) séparant les jonctions sont conçues de façon à être transparentes pour les longueurs d'onde d'intérêts. Les matériaux utilisés dans la fabrication d'une telle cellule offrent des rendements supérieurs à ceux du silicium, mais ils sont plus coûteux. Il est donc pertinent

d'utiliser des systèmes de concentration optique pour rediriger la lumière du Soleil vers la surface du dispositif. La surface peut donc être diminuée sans réduire la quantité de photons incidents et les coûts de production sont réduits.

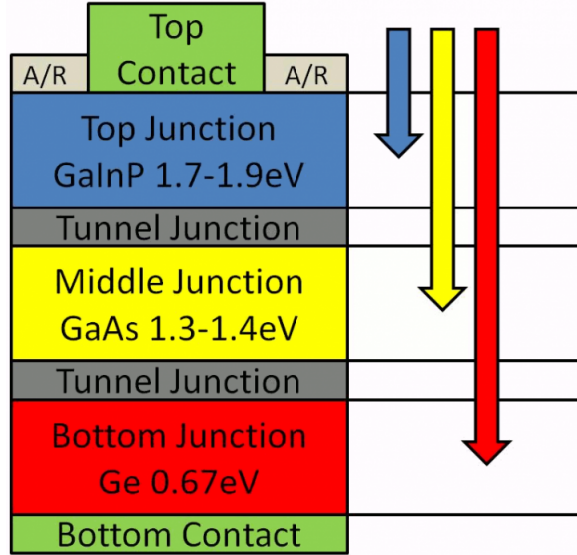


FIGURE 3.5 – Schéma de la structure d'une cellule triple jonction à concentration. Chaque jonction absorbe une partie du spectre de la lumière incidente.[30]

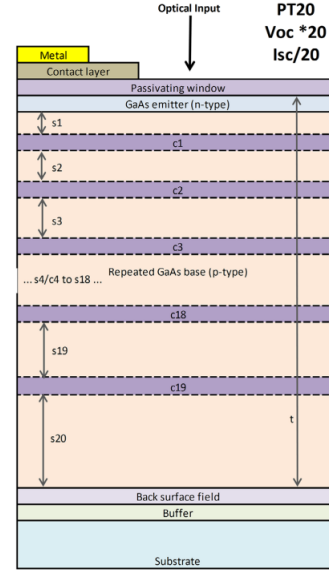


FIGURE 3.6 – Schéma de la structure d'un phototransducteur avec vingt jonctions p/n. L'épaisseur de chaque couche doit augmenter avec la profondeur pour compenser l'atténuation de la lumière dans le matériau.[31]

Certains dispositifs photovoltaïques, comme ceux à l'étude dans ce projet, sont conçus pour convertir une seule longueur d'onde au lieu du spectre du Soleil. Ces cellules ont comme spécialisation de convertir l'énergie provenant d'un laser monochromatique en puissance électrique. La structure d'un phototransducteur de ce genre est nommée *VEHSA* (Vertical Epitaxial Heterostructure Architecture)(fig. 3.6). Chaque jonction est fabriquée avec le même matériau semiconducteur de manière à ce que chaque couche ait exactement le même spectre d'absorption. Puisqu'une jonction ne peut convertir qu'une fraction de l'intensité lumineuse incidente, plusieurs photons ont la capacité de traverser une couche sans générer de paires électrons-trous. L'architecture *VEHSA* permet donc de placer plusieurs jonctions sur le trajet de la lumière afin de convertir une plus grande portion du faisceau laser. Cette augmentation d'efficacité de conversion signifie qu'il y a moins de perte dans la cellule et que la dissipation d'énergie sous forme de chaleur est limitée. Cet aspect est important parce que la puissance d'un faisceau laser peut largement dépasser celle de la lumière pénétrant un dispositif à concentration et une augmentation significative de la température peut briser une cellule.

L'intensité du faisceau incident diminue exponentiellement avec la distance parcourue dans la cellule (section 2.1.3), ce qui signifie qu'il y a plus de photons disponibles à *l'avant* du dispositif qu'en *arrière*. Étant donné que l'efficacité de conversion du matériau est la

même pour toutes les jonctions, la génération de paires électrons-trous est plus importante au dessus de la cellule. Pour éviter qu'une jonction génère moins de courant que les autres (lois de Kirchhoff), la jonction la plus mince se situe donc au dessus de la cellule et l'épaisseur augmente avec chaque couche subséquente. Les jonctions du dessous sont plus épaisses pour compenser la diminution de la quantité de photons incidents. Les couches sont encore une fois séparées par des jonctions tunnel identiques.

L'architecture VESHA permet d'obtenir des tensions aux bornes très élevées parce que l'empilement de plus d'une dizaine de jonctions est plus facile à accomplir dans un phototransducteur que dans une cellule solaire à concentration conventionnelle. La structure cristalline d'une cellule est fabriquée à partir d'une méthode nommée *croissance épitaxiale*. Cette technique consiste à déposer des couches très minces de matériau pouvant être de l'ordre d'un seul atome d'épaisseur sur un substrat à l'intérieur d'un réacteur épitaxial. Cette approche permet entre autre de contrôler précisément la composition atomique du matériau et de faire croître des réseaux cristallins de qualité. Par contre, des défauts sous forme de fissures et de dislocations peuvent se manifester à l'interface entre deux matériaux de compositions atomiques différentes. C'est pourquoi il est plus facile de faire croître une plus grande quantité de jonctions lorsqu'un seul matériau est utilisé.

3.2 Caractérisation des paramètres de diode

3.2.1 Description de la courbe I-V d'une diode

La caractérisation d'une cellule photovoltaïque consiste principalement à étudier ses paramètres de diode. Le terme "diode" réfère au cas d'utilisation de la jonction p/n posée dans un circuit électrique simplement pour imposer une direction au courant. Cette composante électronique permet entre autre de fabriquer un circuit pour convertir le courant alternatif en courant continu. La diode est une composante non-linéaire parce que l'intensité du courant passant par ses bornes ne varie pas linéairement avec la tension appliquée. L'équation caractéristique I-V d'une cellule photovoltaïque (équ. 10) comprend le courant généré par l'effet photovoltaïque $I_{\text{généré}}$, le courant à travers d'une diode I_{diode} , décrit par l'équation de Shockley, et le courant à travers des résistances shunt I_{shunt} . Le facteur d'idéalité d'une diode n est utilisé pour déterminer si le comportement I-V de la diode ressemble à celui d'une diode idéale. Un facteur plus élevé signifie qu'il faut générer plus de paires électrons-trous pour obtenir une intensité de courant donnée. En pratique, le facteur d'idéalité d'une diode est toujours supérieur à 1. Le courant de saturation I_{sat} est formé par les porteurs minoritaires dans le matériau en polarisation inverse.

$$I = I_{\text{généré}} - \underbrace{I_{\text{sat}} \left(e^{\frac{q(V_{\text{bornes}} + IR_{\text{serie}})}{nk_B T}} - 1 \right)}_{I_{\text{diode}}} - \underbrace{\frac{V_{\text{bornes}} + IR_{\text{serie}}}{R_{\text{shunt}}}}_{I_{\text{shunt}}} \quad (10)$$

La courbe I-V caractéristique d'une diode (fig. 3.7) peut être séparée en trois sections distinctes selon la polarisation de la jonction. Comme mentionné dans le chapitre sur la jonction p/n, une diode en polarisation directe laissera passer le courant lorsque le champ induit surpasse celui présent dans la zone de déplétion à l'équilibre (*Built-in potential*). La tension de diode V_d est utilisée pour représenter la région où la génération de courant débute. En polarisation inverse, les porteurs de charge majoritaires de chaque matériau sont forcés à s'éloigner de l'interface et cet appauvrissement de porteurs se traduit par l'élargissement de la zone de déplétion. Les porteurs majoritaires ne peuvent plus diffuser à travers la zone de déplétion et ne génèrent plus de courant. Puisque les porteurs de charge minoritaires ont une charge opposée à celle des porteurs majoritaires, un faible courant (de l'ordre de 10^{-9} à 10^{-6} ampères), nommé "courant de saturation" est créé dans la jonction. Puisque la concentration de porteurs de charge ne dépend que de la température (voir section 2.3.3), la quantité de porteurs minoritaires est indépendante de la tension appliquée. Il sera simplement plus facile pour les porteurs près de la zone de déplétion de diffuser à travers l'interface si la tension de polarisation inverse est plus élevée. Une tension en polarisation inverse supérieure à la tension de claquage de la diode déforme tellement la zone de déplétion qu'un courant peut commencer à circuler entre les bornes. L'apparition de ce courant est typiquement causé par l'effet Zener ou l'effet avalanche, des phénomènes de nature non-destructrice et réversibles. Par contre, l'intensité du courant augmente rapidement après avoir atteint la tension de claquage et la dissipation de chaleur qui en résulte peut briser la jonction p/n.

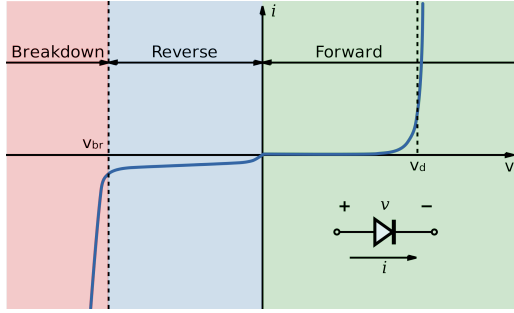


FIGURE 3.7 – Courbe I-V caractéristique d'une diode.[32]

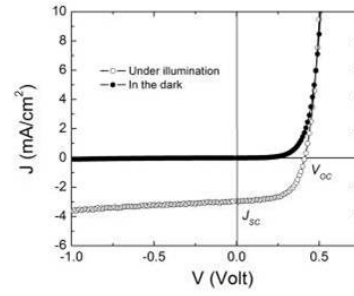


FIGURE 3.8 – Courbe I-V d'une cellule photovoltaïque avec et sans source de lumière externe.[33]

En théorie, la courbe I-V d'un dispositif photovoltaïque sans source de lumière externe est identique à celle d'une diode idéale. En pratique, la présence de résistances parasites et de défauts dans la structure cristalline déforme la courbe I-V. Une cellule photovoltaïque en polarisation directe exposée à un rayonnement de longueur d'onde approprié (voir section 2.3.1) fait circuler un courant pour des valeurs de tension inférieures à la tension de seuil. Cela se traduit en un déplacement de la courbe I-V vers les valeurs de courant négatives (fig 3.8). C'est en étudiant la courbe I-V en polarisation directe, avec et sans illumination, qu'il est possible d'extraire les paramètres de diode d'une cellule photovoltaïque.

3.2.2 Courbe I-V avec illumination

Pour commencer, la courbe I-V d'une cellule photovoltaïque sous illumination est typiquement présentée avec des valeurs de courant négatives sur l'axe des ordonnées comme illustré dans la figure 3.9. Il y a deux paramètres de diodes à extraire des coordonnées à l'origine de la courbe I-V, le courant de court-circuit (*short-circuit current* ou I_{sc}) et la tension en circuit ouvert (*open-circuit voltage* ou V_{oc}). Le courant de court-circuit se situe à l'ordonnée à l'origine de la courbe et représente le courant maximal généré par la cellule sous illumination. Idéalement, ce courant est maintenu jusqu'à ce que la tension appliquée approche la tension de diode V_d et un plateau est observable sur la courbe I-V. L'application de tensions supérieures à V_d cause une chute rapide de l'intensité du courant jusqu'à ce que le dispositif ne conduise plus de courant, tout comme un circuit ouvert. La tension de circuit ouvert se situe donc à l'abscisse à l'origine et correspond à la tension aux bornes d'une cellule illuminée et isolée électriquement. La valeur du V_{oc} d'un dispositif dépend de sa composition, de la température et de la quantité de jonctions p/n empilées (voir section 2.3.4). Dans le cas des dispositifs à l'étude, chaque jonction p/n ajoute environ 1.2 V à la valeur du V_{oc} . Tout comme une batterie, l'application d'une tension trop élevée aux bornes d'un circuit peut briser certaines composantes, donc il faut s'assurer que les caractéristiques du dispositif photovoltaïque soient appropriées. Durant la caractérisation d'une cellule, appliquer des tensions supérieures au V_{oc} peut poser un certain danger parce que l'intensité du courant positif augmente rapidement et la dissipation de chaleur résultante peut briser le dispositif.

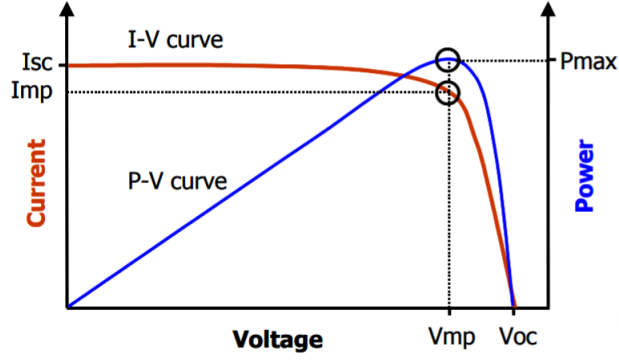


FIGURE 3.9 – Courbes I-V et P-V typique d'une cellule photovoltaïque.[34]

La figure 3.9 contient aussi la courbe de la puissance en fonction de la tension appliquée. Le point d'opération optimal d'une cellule se situe à la valeur maximale de la courbe P-V. En concordance avec la formule de la puissance électrique (éq. 11), les valeurs de courant et de tension pour obtenir la puissance maximale sont respectivement nommées I_{mpp} (*current at max peak power*) et V_{mpp} (*voltage at max peak power*). Pour une cellule photovoltaïque donnée, le I_{mpp} et le V_{mpp} correspondent aux paramètres d'utilisation optimaux.

$$P = V * I \quad (11)$$

La forme de la courbe I-V permet de déterminer la qualité d'un dispositif photovoltaïque en terme de ses résistances parasites et de la conception de sa structure. Tout d'abord, le *Fill factor* (FF) correspond au ratio entre la puissance maximale théorique et pratique pour une cellule donnée. La puissance maximale théorique est obtenue en multipliant le I_{sc} et le V_{oc} et la courbe I-V associée à une telle puissance formerait un carré. L'illustration de droite de la figure 3.10 décrit le type de défauts pouvant déformer la courbe de manière à réduire son rendement ainsi que son *Fill factor*.

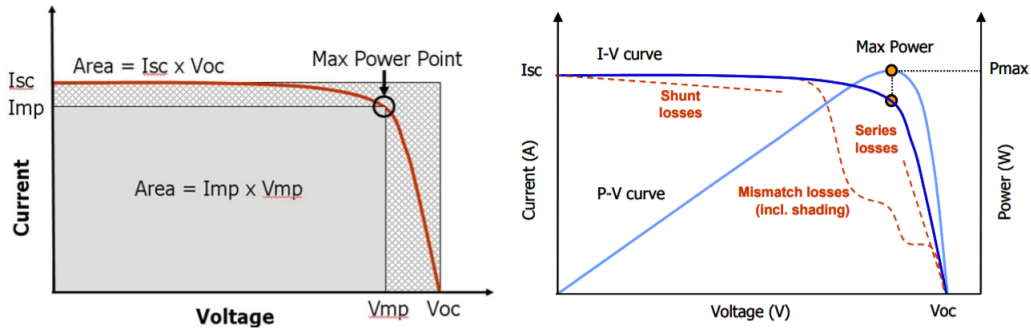


FIGURE 3.10 – Représentation graphique des paramètres utilisés dans le calcul du *Fill Factor* et impact des résistances parasites sur la forme de la courbe I-V.[35]

Les deux types de résistances parasites sont les résistance en série et les résistances parallèles (*shunt resistance*). Les résistances parallèles se manifestent lorsqu'il y a des défauts dans la structure cristalline des jonctions p/n. Les électrons dans la bande de conduction

empruntent des parcours alternatifs au lieu de traverser la cellule pour participer au courant total. Une portion de la perte de puissance liée aux résistances en série se produit lorsque le courant circule dans les contacts métalliques et dans le volume de la cellule. L'autre source de résistance en série se situe à l'interface entre le matériau semiconducteur et les contacts métalliques (voir fig. 3.6). Les *mismatch losses* se produisent lorsqu'une composante du circuit électrique ne fournit pas un rendement similaire au reste du système. Comme mentionné dans la section 2.3.4, les lois de Kirchoff indiquent que le courant circulant dans un circuit simple est constant sur tout le trajet. Dans le cas d'une cellule multi-jonction, le rendement total est limité par la jonction la moins efficace. Dans un système composé de plusieurs cellules photovoltaïques connectées en séries, la cellule générant le moins de courant empêche les autres dispositifs de fonctionner à leur plein potentiel. Une cellule ou une jonction défectueuse dissipe une portion de la puissance perdue sous la forme de chaleur, ce qui peut réduire davantage les performances d'un système dépourvu d'un mécanisme de refroidissement efficace.

3.2.3 Courbe I-V sans illumination

La courbe I-V sans illumination (*Dark I-V* fig. 3.11) contient aussi des informations concernant les paramètres de diodes et les résistances parasites. Tout d'abord, la valeur du courant de saturation et du facteur d'idéalité peuvent être obtenus suite à un lissage de la courbe expérimentale fait à partir de l'équation du comportement I-V d'une diode (équ. 10). Ensuite, la comparaison entre le logarithme de la courbe dark I-V de la cellule et d'une diode idéale permet d'identifier la présence de résistances parasites. Le logarithme de la courbe dark I-V d'une diode parfaite est complètement droit et la présence de résistances parasites se traduit par une déformation de cette droite (fig. 3.12). Il faut encore une fois utiliser l'équation 10 pour déterminer les valeurs des résistances en série et en parallèle.

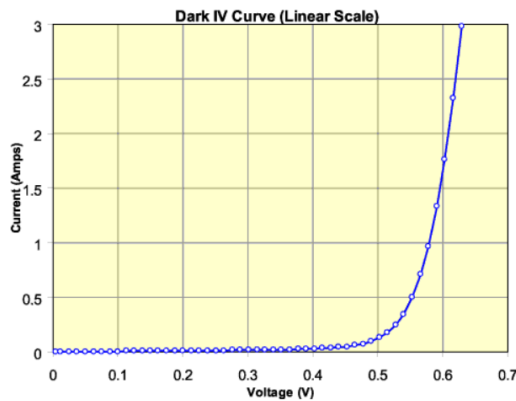


FIGURE 3.11 – Courbe I-V caractéristique d'une diode sans illumination.[36]

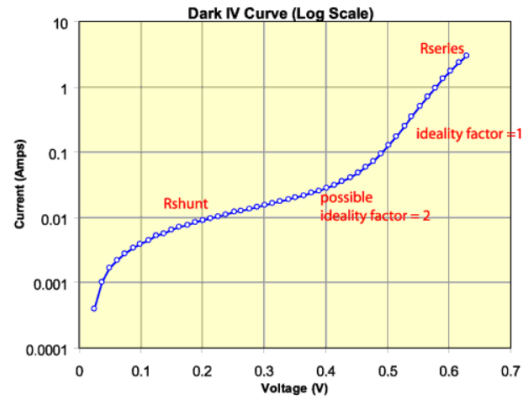


FIGURE 3.12 – Impact des résistances parasites sur le logarithme de la courbe I-V sans illumination. Le logarithme de la courbe I-V sans illumination d'une diode parfaite est droite.[37]

3.2.4 Efficacité quantique

La caractérisation d'un dispositif photovoltaïque inclut l'étude de l'efficacité de conversion afin de déterminer le rendement total d'une cellule. Le rendement total d'un dispositif est obtenu en comparant l'intensité du rayonnement lumineux incident à la puissance électrique générée par la cellule. L'efficacité quantique concerne plus précisément la proportion de photons incidents ayant été absorbés pour ensuite générer une paire électron-trou. L'étude de l'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde des photons incidents permet donc d'évaluer la qualité de la cellule. Dans le cas d'une cellule multi-jonction, la combinaison des spectres d'efficacité quantique de chaque couche représente l'efficacité quantique totale de la cellule (fig. 2.22). Le spectre d'efficacité quantique d'une cellule multi-jonction permet donc d'identifier une jonction limitant le rendement total du système (section 2.3.4). La caractérisation d'une cellule solaire est généralement effectuée à l'aide d'une source lumineuse polychromatique, de filtre bloquant certaines portions du spectre d'émission et d'un monochromateur [38]. Un laser polychromatique accordable peut-être aussi utilisé durant la caractérisation d'un convertisseur de puissance laser.

3.2.5 Observation visuelle des défauts

La combinaison de la caractérisation I-V et d'une inspection visuelle permet d'identifier les défauts limitant le rendement d'un dispositif photovoltaïque. De plus, lorsqu'une cellule ne fonctionne tout simplement pas, la caractérisation des paramètres de diode ne fournit pas d'informations en lien avec les défauts. Certaines imperfections, telles qu'un bris majeur à la surface de la cellule, sont visibles à l'oeil nu, mais il est souvent nécessaire de faire une inspection plus en détail pour identifier les sources de pertes de rendement. Quelques méthodes d'observation visuelles ont donc été développées pour examiner la qualité du matériau semiconducteur et de la structure du dispositif.

Tout d'abord, l'imagerie rayon-X est utilisée pour sonder la qualité du *packaging* de la cellule. Le *packaging* comprend les soudures, les couches de métallisations et l'époxy posé en tant qu'agent adhésif conducteur entre le support et la cellule. Les rayons-X ont une longueur d'onde trop courte pour interagir avec la structure de bande du matériau semiconducteur et les photons peuvent traverser le corps de la cellule sans être trop absorbés. Par contre, l'intensité du rayonnement rayon-X s'atténue rapidement lors d'une propagation dans un métal. En posant une cellule entre une source de rayons-X et un photodétecteur, on obtient une image où les régions plus sombres correspondent aux éléments métalliques du *packaging*. Lorsque l'étalement de l'époxy est non uniforme, la cellule ne peut pas évacuer sa chaleur correctement et le rendement du dispositif diminue (fig. 3.13). Le terme *hot spot* est utilisé pour décrire une région où la dissipation de chaleur est importante. Dans le cas d'une connexion métallique brisée, le courant doit emprunter des chemins alternatifs et la densité de courant près des autres contacts augmente. La dissipation de chaleur est donc plus importante près des connexions intacts et un *hot spot* est créé.

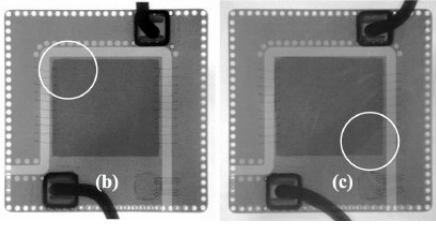


FIGURE 3.13 – Imagerie par transmission des rayons-X permettant d’observer des défauts de fabrication. Le manque d’époxy de la cellule c) et la zone dégradée de la cellule b) sont encerclés.[39]

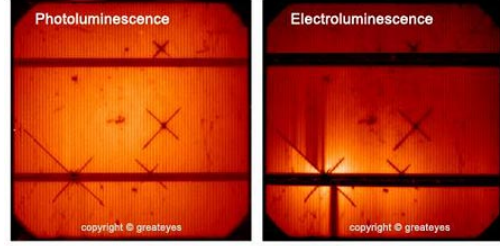


FIGURE 3.14 – Image des défauts dans le corps d’une cellule obtenue à partir de la photoluminescence et l’électroluminescence. Les défauts ont tendance à se propager en suivant l’orientation du réseau cristallin. Les *gridlines* et les *hot spot* sont facilement identifiables.[40]

Un autre type d’imagerie est utilisé pour sonder l’intérieur du corps de la cellule. L’imagerie par photoluminescence et par électroluminescence consiste à introduire de l’énergie dans la structure, que ce soit avec une source de lumière ou par l’application d’une tension aux bornes du dispositif, afin d’exciter les électrons. Durant le processus de relaxation (voir section 2.3.3), les électrons retournent à leur état énergétique initial et émettent le surplus d’énergie sous forme de photons. La luminescence résultante est ensuite captée par un photodétecteur pour générer une image. Étant donné que les électrons passent de la bande de valence à la bande de conduction et vice-versa, l’énergie des photons émis devrait correspondre à l’énergie couverte par la bande interdite. Plus le spectre d’émission est étroit, plus la structure est de qualité. Une raie sombre correspond à une région où il n’y a pas eu d’émissions photoniques (fig. 3.14), ce qui peut être dû à une recombinaison non-radiative ou un effet d’ombrage. Un site de recombinaison non-radiative peut être causé par une densité de défauts trop élevée dans la structure cristalline de la cellule et l’énergie libérée durant la relaxation des électrons est émise sous forme de chaleur. Dans le cas de la photoluminescence, la présence de saletés ou d’imperfections à la surface du dispositif empêche les photons d’atteindre les électrons.

4 Description de l'équipement utilisé

4.1 Montage expérimental initial

4.1.1 Mesure de courant, de tension et de température

Le montage de base pour caractériser le comportement I-V d'un dispositif photovoltaïque comporte des instruments de mesure à source de courant et de tension (*Source Measurement Unit "SMU"*). Ces appareils ont la capacité d'appliquer une tension aux bornes d'un dispositif tout en mesurant le courant circulant dans le circuit. Il est donc possible d'effectuer une mesure I-V avec un seul appareil et ainsi éviter d'encombrer le montage expérimental. Le SMU utilisé dans le montage actuel est un Keithley 2601B (fig. 4.1), un appareil fabriqué par Tektronix Company. Le Keithley 2601B peut fournir une puissance électrique totale de 40 watt en appliquant une tension de 40 volts et en laissant circuler un courant allant jusqu'à 1 ampère. Un autre mode disponible limite la tension appliquée à 6 volts et permet d'obtenir des courants allant jusqu'à trois ampères. Afin de protéger les échantillons durant les mesures, le Keithley 2601B peut agir comme une source ou un drain selon les paramètres de mesure. Par exemple, durant une mesure I-V, le Keithley 2601B est configuré pour agir en tant que drain de courant lorsque la direction de propagation du courant change. Les échantillons ne sont pas conçus pour supporter un courant inverse, donc le courant excédentaire est redirigé vers le circuit interne du Keithley 2601B. Les séries de commandes sont envoyées au le Keithley 2601B sous forme de script généré par le programme d'acquisition Labview.



FIGURE 4.1 – Tektronix Keithley 2601B, un source de puissance et un instrument de mesure de courant-tension



FIGURE 4.2 – Tektronix Keithley 2510, un instrument de mesure de la température

Le montage de caractérisation actuel est aussi muni d'un Keithley 2501 (fig. 4.2) afin de surveiller la température d'un échantillon durant une mesure I-V. Le Keithley 2510 peut lire le signal provenant d'un thermistor, d'un thermo-couple ou d'un RTD (*Resistance temperature detector*). Le suivi de la température durant une mesure I-V permet d'identifier si le dispositif a la capacité de supporter la puissance de la lumière incidente. Une augmentation continue de la température durant une mesure indique que l'échantillon n'est pas assez efficace ou que le système de refroidissement en place n'est pas suffisant. Dans le cas où l'échantillon est conçu pour convertir efficacement la puissance incidente utilisée, l'augmentation graduelle de la température signifie que la concentration de défauts est trop élevée ou que le dispositif a subi des dommages durant les manipulations. Le Keithley 2510 peut aussi être utilisé pour alimenter un TEC (*Thermoelectric cooling*) et maintenir la température du système. Le

Keithley 2510 est un régulateur PID (*Proportional-integral-derivative*), il utilise la mesure de la température afin de déterminer la puissance à fournir au TEC afin de stabiliser la température du dispositif.

4.1.2 Lasers monochromatiques

L'illumination d'une cellule photovoltaïque est habituellement effectuée par une lampe polychromatique [41], mais le mode de fonctionnement des phototransducteurs implique l'utilisation de lasers monochromatiques. Le montage contient un laser 808 nm de 30 watts, un laser 808 nm de 50 watts, un laser 830 nm de 20 watts, un laser 860 nm de 20 watts et un laser 915 nm de 20 watts. Chaque laser est choisi pour convenir aux particularités des différents phototransducteurs à l'étude. Bien que la longueur d'onde d'émission de chaque laser est fixe, la puissance de sortie peut être contrôlée à partir des sources de puissance externes. Une charte de calibration décrivant la relation entre la tension appliquée et la puissance de sortie obtenue a été mesuré et est disponible pour chaque laser.

4.1.3 Source de puissance

Le montage est muni de deux sources de puissance électrique afin d'alimenter les lasers monochromatiques et les systèmes de refroidissement. Le *Rhode & Schwartz HMP2020* (fig. 4.3) est une source de puissance pouvant alimenter deux instruments à la fois. Le Rhode & Schwartz peut appliquer une tension maximale de 32 volts et les canaux 1 et 2 peuvent fournir des puissances de 160 watts et 80 watts respectivement. Durant une mesure I-V avec un laser monochromatique, le canal 1 alimente la diode laser tandis que le canal 2 alimente le TEC. Contrairement au Keithley 2510, le R&S n'est pas un contrôleur PID et alimente le TEC avec un voltage et un courant constant peut importe la température de l'échantillon.



FIGURE 4.3 – Rhode & Schwartz HMP2020, une source de puissance à deux canaux.



FIGURE 4.4 – Sorensen DLM 20-30, une source de puissance.

Le *Sorensen DLM 20-30* (fig. 4.4) peut fournir une puissance maximale de 600 watts en appliquant des tensions allant jusqu'à 30 volts. Le DLM 20-30 est utilisé pour alimenter le ventilateur attaché aux *heatsinks* des lasers monochromatiques.

4.1.4 Mesure de puissance du faisceau laser

Un wattmètre est compris dans le montage afin de mesurer la puissance des faisceaux lasers. Les chartes de calibration disponibles permettent généralement de connaître la puissance nécessaire à fournir aux laser monochromatiques afin d'obtenir la puissance de sortie désirée. Par contre, la dégradation graduelle de l'équipement impose que ces chartes soient

mise à jour régulièrement. De plus, un wattmètre permet d'utiliser un laser sans charte simplement en mesurant la puissance du faisceau incident. Le *Newport 843-R-USB* (fig. 4.5) peut effectuer jusqu'à 15 mesures par seconde avec une précision de $\pm 0.25\%$. Une connexion USB permet au *Newport 843-R-USB* de communiquer avec un ordinateur pour envoyer ses résultats de mesure et pour recevoir des commandes telles qu'une modification de la plage de mesure.



FIGURE 4.5 – Newport 843-R-USB, un instrument de mesure de puissance lumineuse.

4.2 Modifications apportées au montage expérimental

4.2.1 Caractérisation I-V en fonction de l'angle d'incidence

Il est pertinent d'évaluer les performances d'un dispositif photovoltaïque tout en modifiant l'angle d'incidence de la lumière afin de déterminer les conditions d'utilisation optimales. Dans le cas des cellules solaires, un gain de performance significatif est obtenu lorsque le système contient un mécanisme pour suivre le déplacement du Soleil [42]. Un moteur pas-à-pas a donc été ajouté au montage de caractérisation dans le but de faire tourner un support à échantillon sous le faisceau laser. La communication entre le moteur et l'ordinateur se fait à partir d'un micro-contrôleur *Arduino Uno* et d'une carte pilote *Easy Driver*. Ce montage permet d'évaluer l'efficacité de la couche antireflet et aussi d'étudier la qualité de la surface du matériau semiconducteur.

Dans un moteur pas-à-pas hybride, l'arbre moteur du rotor contient un aimant permanent polarisé selon l'axe de la tige. Une roue de métal ferromagnétique dentée est positionnée sur chaque pôle de l'arbre moteur afin d'induire des pôles magnétiques aux extrémités (fig. 4.6). Le stator est composé de quatre paires d'électroaimants connectées à deux séries de bobines différentes (fig. 4.7). La surface des électroaimants est recouverte de pointes avec un espacement similaire à celui des dents du rotor. Lorsqu'une série de bobines est alimentée, une paire d'électroaimants opposés agit comme des pôles nord et sud ; le reste n'a pas de polarisation. Ensuite, les dents polarisées s'alignent avec les pôles magnétiques opposés, ce qui fait tourner la tige. Après la rotation, les dents du rotor sont alignées avec les pointes des électroaimants actifs et désalignées avec celles des électroaimants inactifs. L'alimentation alternative de chaque circuit de bobine permet donc d'engendrer une rotation.

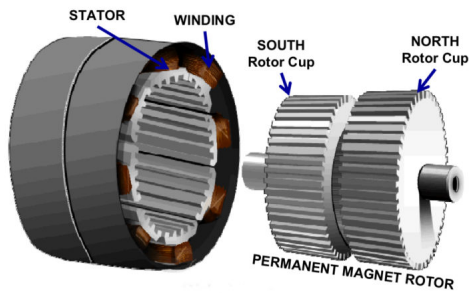


FIGURE 4.6 – Représentation des roues magnétiques à l'intérieur d'un moteur pas-à-pas hybride[43]

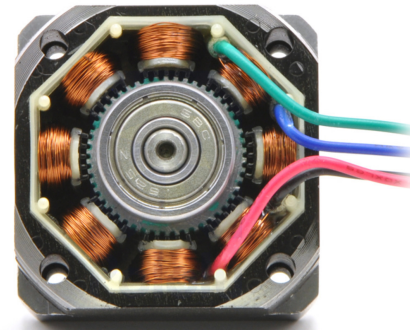


FIGURE 4.7 – Représentation des paires d'électroaimant à l'intérieur d'un moteur pas-à-pas hybride[44]

Le SY42STH38-0406A (fig. 4.8) est un moteur pas-à-pas unipolaire avec une résolution angulaire de 1.8° par pas, c'est-à-dire 200 pas par rotation complète. Avec une alimentation de 12 volts, ce moteur a un couple de maintien de 2.6 Kg-cm et une inertie de rotation de $54 \text{ g} - \text{cm}^2$. La masse combinée du support et d'un échantillon (fig. 4.8) est trop faible pour restreindre le mouvement de l'axe rotatif du moteur. Il est donc peu probable que le moteur "manque" un pas et que la précision de la mesure soit affectée. La fabrication des supports à échantillons se fait par impression 3D afin d'adapter rapidement le montage aux nouveaux formats de dispositif.

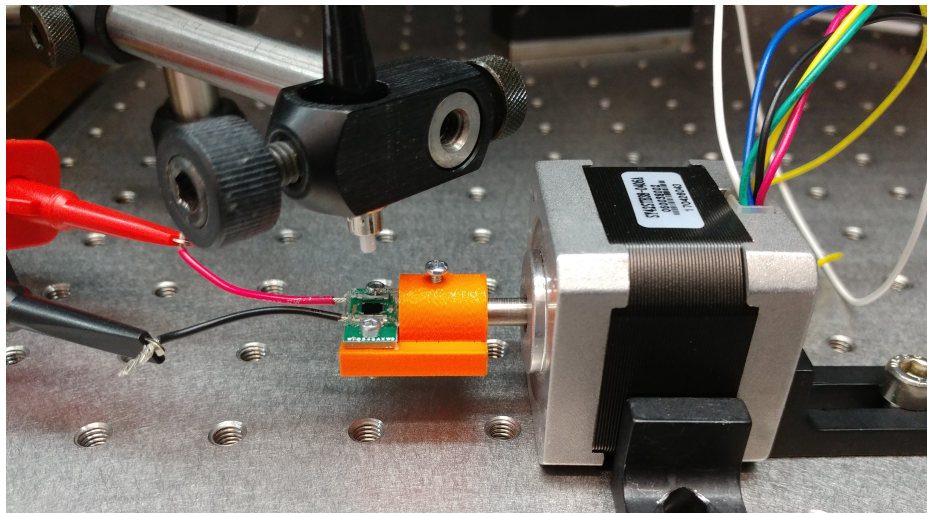


FIGURE 4.8 – Image du support à échantillon attaché au moteur pas-à-pas. L'impression 3D permet de créer des prototype de support rapidement.

Le moteur est contrôlé à partir d'un Arduino Uno rev.3 (fig. 4.9) en communication avec un ordinateur portable via une connexion USB. La source de tension du moteur est connectée à l'Arduino Uno afin que le microcontrôleur se charge d'acheminer le courant. L'Arduino Uno est lui-même alimenté à partir d'une source de tension de 5 volts afin de pouvoir générer les signaux électriques nécessaires durant une manipulation. Le rôle du microprocesseur est de traduire les commandes provenant de l'ordinateur en signaux électriques pour alimenter correctement les bobines du moteur. Un microprogramme est installé sur l'Arduino pour lui permettre de lire des commandes provenant de programmes externes.

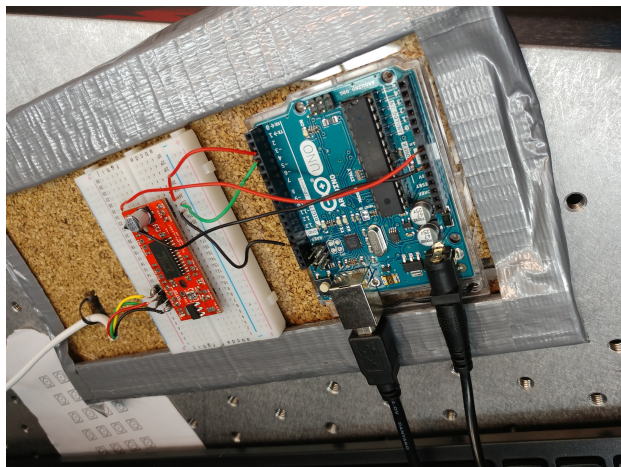


FIGURE 4.9 – Arduino Uno connecté au Easy Driver

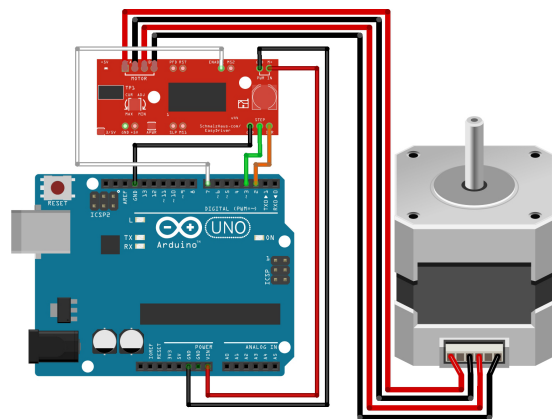


FIGURE 4.10 – Diagramme des connexions entre l'Arduino Uno, le Easy Driver et le moteur pas-à-pas[45]

Une carte pilote *Easy Driver* est employée afin de simplifier les commandes nécessaires au fonctionnement du moteur en plus d'améliorer les performances du moteur. Un moteur unipolaire nécessite généralement six fils pour fonctionner, trois fils par circuit de bobines. Deux paires de fils sont utilisées pour alimenter les deux circuits tandis que les deux autres séparent chaque circuit en deux. Le courant circule uniquement dans une moitié du circuit à la fois, ce qui réduit le couple du moteur. Au lieu d'inverser le courant pour inverser les pôles magnétiques, le courant est simplement redirigé vers l'autre moitié du circuit. Le *Easy Driver* peut ignorer les fils additionnels et inverser la direction du courant par lui-même. Les bobines peuvent donc être utilisées à leur plein potentiel et le moteur agit comme un moteur bipolaire. De plus, seulement deux commandes sont nécessaires pour faire fonctionner la carte pilote, le signal du pas et celui de la direction. La programmation est simplifiée parce que le nombre total de commandes nécessaires passe de six à deux. La configuration des connexions est représentée sur le diagramme de la fig. 4.10.

4.2.2 Caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde

La mesure de l'efficacité quantique en fonction de la longueur d'onde d'une cellule solaire ne permet pas seulement d'estimer son rendement réel, mais aussi d'identifier la présence de défauts dans le dispositif. Bien que les phototransducteurs à l'étude sont conçus pour convertir une seule longueur d'onde, il est intéressant de se pencher sur sa réponse spectrale. La gamme de lasers monochromatiques disponibles dans le montage ne permet pas d'effectuer ce genre de mesure.

De plus, l'utilisation de lasers monochromatiques pose un problème de logistique sur le long terme. À chaque fois qu'un phototransducteur avec une nouvelle longueur d'onde d'absorption est développé par le groupe du Prof. Simon Fafard, il faut acquérir un nouveau laser qui ne peut pas vraiment être utilisé pour caractériser les anciens dispositifs. Puisque l'espace alloué à chaque chercheur dans les laboratoires du 3it est limité, il est peu pratique d'avoir un inventaire grandissant de lasers. Un laser accordable a donc été ajouté pour conduire des mesures des caractéristiques I-V en fonction de la longueur d'onde et pour remédier au problème d'entreposage.

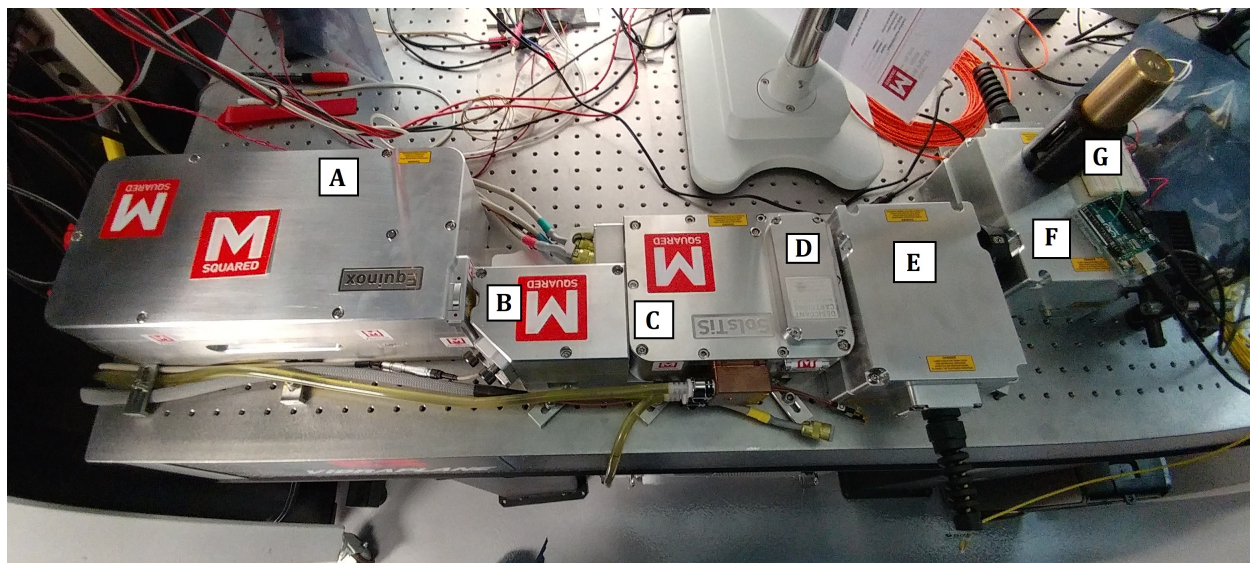


FIGURE 4.11 – Architecture du laser accordable : A) Pompe Optique Equinox, B) Module optique de la pompe, C) Cavité du SolsTiS, D) Cartouche de dessiccation, E) Cavité de référence, F) Module de sortie de la fibre optique, G) Obturateur du laser

Le SolsTiS est un laser accordable fabriqué par MSquared, une compagnie située à Glasgow en Écosse qui se spécialise dans le développement de technologies photoniques. Le spectre d'émission de ce laser est compris entre 725 nm et 960 nm. Le SolsTiS peut générer un faisceau avec une puissance maximale de 6 watts aux environs de 780 nm. Le système permettant au SolsTiS de fonctionner est composé d'un boîtier contenant le milieu amplificateur, d'une pompe optique, d'un ondemètre et d'un agencement de miroir pour contrôler le trajet du faisceau. Le terme "SolsTiS" réfère plus précisément à la cavité optique avec un cristal de saphir dopé d'ions de titane en tant que milieu amplificateur.

Le cristal est excité à partir d'un faisceau laser à 532 nm provenant de la pompe optique *Equinox* (fig. 4.11 A, 4.12). L'*Equinox* peut générer un faisceau avec une puissance maximale de 18 watts. Le faisceau à la sortie de l'*Equinox* est acheminé à la cavité du SolsTiS (fig. 4.11 C) à partir d'un réseau de miroirs confiné dans le module d'optique de la pompe (fig. 4.11 B). La position des miroirs peut être modifiée manuellement à l'aide de *thumbscrews* sur le côté du module.

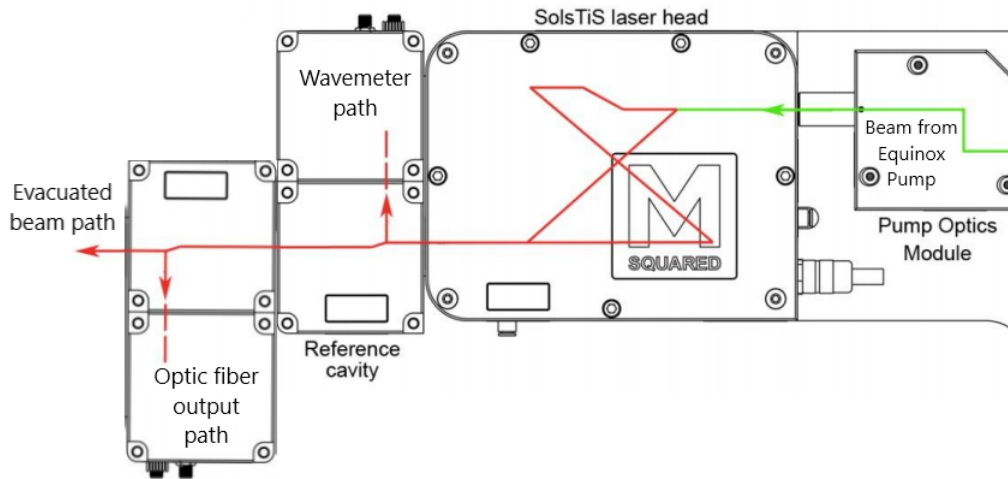


FIGURE 4.12 – Schéma du parcours optique du faisceau dans le SolStis. Le rayon vert provient de la pompe optique Equinox et la longueur d'onde est déterminé dans la tête du laser SolsTiS. Le faisceau passe au travers d'une cavité de référence avant d'être acheminé vers la fibre optique ou d'être expulsé du système.[46]

La longueur d'onde du faisceau est contrôlée à partir d'un filtre biréfringent et d'un étalon (fig. 4.13). Une diode optique est employé pour forcer une propagation unidirectionnelle de la lumière dans le SolsTiS. Un filtre biréfringent est composé d'un milieu biréfringent placé entre deux polariseurs. L'indice de réfraction d'un milieu biréfringent ne dépend pas seulement de la longueur d'onde de la lumière, mais aussi de sa polarisation et de sa direction de propagation. Ce type de matériau permet de créer un retard de phase entre la lumière polarisée P et S, ce qui a comme effet de modifier la polarisation totale du faisceau à la sortie. Ce changement de polarisation se traduit par une atténuation de l'intensité de la lumière après avoir traversé le polariseur final. Pour certaines longueurs d'onde, le retard de phase a une valeur de 2π et la polarisation totale ne change pas. Le filtre permet donc d'isoler une longueur d'onde en atténuant l'intensité du reste du spectre. En modifiant l'angle d'incidence du rayon avec une rotation du filtre, il est possible d'imposer une longueur d'onde préférentielle.

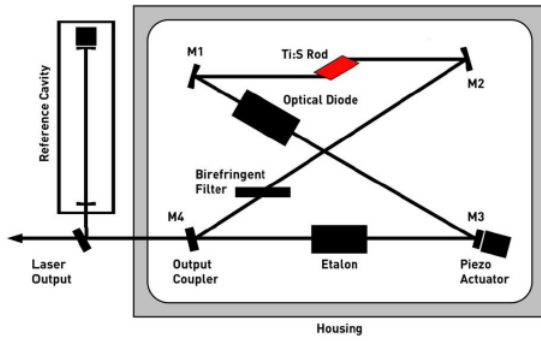


FIGURE 4.13 – Schéma de la configuration "papillon" dans le SolsTiS. La rotation du filtre biréfringent sur le parcours du faisceau permet d'isoler une longueur d'onde en atténuant l'intensité du reste du spectre.[46]

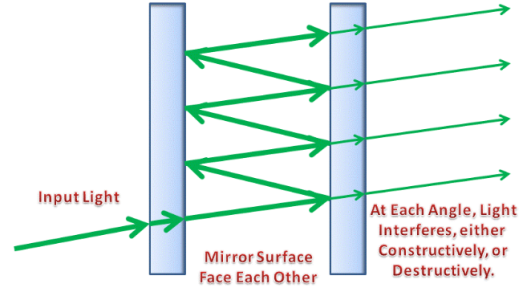


FIGURE 4.14 – Représentation d'un interféromètre de Fabry-Perot. Selon la longueur d'onde et l'angle d'incidence de la lumière incident, les rayons transmis peuvent subir de l'interférence destructive ou constructive. En ajustant la distance entre les miroirs, une longueur d'onde préférentiel peut être isolé.[47]

Le faisceau à la sortie du filtre est ensuite acheminé à l'étalon pour raffiner davantage le spectre du faisceau provenant du filtre biréfringent. Un étalon, aussi nommé interféromètre de Fabry-Perot (fig. 4.14), est composé de deux miroirs semi-réfléchissant parallèles avec des surfaces arrières recouvertes de couches antireflets. Lorsqu'un faisceau de lumière est introduit dans l'étalon, il est réfléchi à répétition entre les deux miroirs jusqu'à ce qu'il atteigne la sortie. Puisqu'une portion de la lumière est transmise à chaque réflexion, l'intensité du faisceau s'atténue graduellement. Par contre, tout comme une couche antireflet, il est possible que les rayons transmis subissent de l'interférence destructive et que les pertes par transmission soient minimales. Pour ce faire, il faut que la différence de parcours entre deux réflexions corresponde à un déphasage de π . Pour une longueur d'onde donnée, cette différence de parcours ne dépend que de l'angle d'incidence du faisceau et de la distance entre les miroirs. Lorsqu'un faisceau polychromatique entre dans l'étalon, la distance parcourue est la même pour toutes les longueurs, sauf que le déphasage après chaque réflexions varie. Il est donc possible de favoriser la propagation de certaines longueurs d'onde tout en atténuant l'intensité des longueurs d'onde voisines. L'étalon présent dans le SolsTiS est conçu de manière à ce que l'angle d'incidence soit fixe et que la distance entre les miroirs soit variable pour ajuster la longueur d'onde préférentielle.

Afin de vérifier la qualité de la filtration spectrale du faisceau laser, le faisceau à la sortie du SolsTiS est envoyé dans une cavité de référence (fig. 4.11 E, 4.12) avant d'atteindre le dispositif photovoltaïque à l'étude. Un miroir semi-réfléchissant divise le rayon en deux portions, un faisceau est envoyé vers un ondemètre et l'autre est acheminé vers le dernier module du système. Cette configuration permet de mesurer la longueur d'onde de la lumière durant une mesure I-V. L'ondemètre en question est un Angstrom WS6-600 (fig. 4.15) avec une gamme de mesures se situant entre 330 nm et 1180 nm et une précision absolue de 600 Mhz. Le WS6-600 peut effectuer jusqu'à 950 mesures par seconde dans le spectre du visible et jusqu'à 1800 mesures par seconde dans l'infrarouge.

La dernière cavité (fig. 4.11 F, 4.12) a pour but de contrôler la puissance de sortie du laser en plus d’acheminer le faisceau laser vers l’entrée de la fibre optique. Un miroir semi-réfléchissant sépare à nouveau le faisceau en deux, un faisceau est redirigé vers un réseau de miroirs afin d’atteindre la fibre et l’autre quitte la structure du laser. Un polariseur linéaire pivotant est positionné à l’entrée de la cavité pour ajuster manuellement la proportion du faisceau atteignant la fibre. Le faisceau éjecté du système est intercepté par un wattmètre afin d’estimer la puissance du faisceau à la sortie de la fibre. La puissance à la sortie de la fibre est déterminée à partir de la mesure avec le wattmètre et un coefficient de proportionnalité expérimental (section 6.1).



FIGURE 4.15 – Angstrom WS6-600, un ondemètre.

Un obturateur de faisceau laser est installé juste avant l’entrée de la fibre optique (fig. 4.11 G) afin de limiter l’exposition du faisceau sans arrêter le pompage optique. L’obturateur est composé d’un bloc absorbant l’intensité du faisceau attaché au bout d’un actionneur linéaire. Un trou au dessus de la cavité de référence permet à la tige de piston de se déplacer pour positionner le bloc absorbant dans le trajet du faisceau. Tout comme pour le montage du support rotatif, l’actionneur linéaire est contrôlé à partir d’un Arduino Uno connecté à l’ordinateur. Un support additionnel fabriqué par impression 3D est installé afin d’aligner l’actionneur linéaire et aussi de solidifier le montage. Cette obturateur ne provient pas de MSquared, mais son implémentation est nécessaire au fonctionnement à long terme du système. En effet, le SolsTiS est conçu pour être en fonction à puissance maximale sans interruption. Par contre, une exposition continue peut chauffer et endommager les échantillons à l’étude. L’obturateur permet donc de bloquer le faisceau tout en laissant l’Equinox fonctionner à puissance maximale.

La génération d’un faisceau laser à haute puissance engendre une dissipation de chaleur importante au niveau de la tête du laser. De plus, le SolsTiS peut être opéré en continu, ce qui ne laisse pas le temps au système de se refroidir de manière passive. Une boucle fermée de refroidissement à l’eau est donc intégrée au SolsTiS. La circulation et le refroidissement de l’eau est gérée par une pompe haute puissance positionnée sous la table du montage. La

pompe est continuellement en opération afin de stabiliser la température du laser durant les manipulations et pour assurer le bon fonctionnement à long terme du système



FIGURE 4.16 – Module de contrôle ICE-BLOC. Le DD-40 controle la tête du laser de l’Equinox et le TC-4 controle la température de la pompe optique.[46]

Le système du SolsTiS est équipé de module de contrôle *Ice-Bloc* (fig. 4.16) afin d’établir la communication entre l’ordinateur et les différentes composantes du laser. Une connexion Ethernet entre l’ordinateur et les *Ice-Bloc* permet l’envoi de commandes suivant le protocole de communication TCP/IP. Un des *Ice-Bloc* se charge de maintenir la température des composantes de l’Equinox à la température d’opération idéale. Un second *Ice-Bloc* est connecté à l’Equinox afin de contrôler la puissance de sortie de la diode laser, en plus de gérer les périodes de réchauffement/refroidissement lors de l’ouverture/fermeture du laser. Le dernier *Ice-Bloc* permet de définir la longueur d’onde d’émission cible du SolsTiS en contrôlant l’étalon et le filtre biréfringent.

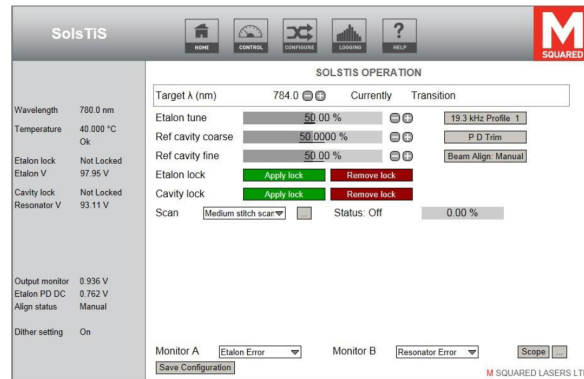


FIGURE 4.17 – Interface web utilisé pour contrôler la longueur d’onde d’émission du SolsTiS. Un autre interface est disponible pour contrôler la puissance de sortie de la pompe optique Equinox[48]

Finalement, le laser est accompagné d'une interface web développée par MSquared pour communiquer avec les Ice-Bloc (fig. 4.17). Ce programme permet d'établir les paramètres de connexion IP nécessaires à la communication entre les différents instruments. C'est à partir de cette interface qu'il est possible d'allumer et d'éteindre le laser, de modifier la puissance de sortie de l'Equinox et de changer la longueur d'onde d'émission du SolsTiS. Généralement, les paramètres cités ci-haut sont suffisant pour obtenir les résultats désirés parce que les processus automatiques sont assez fiables. Par contre, l'interface web offre tout de même la possibilité de contrôler le comportement de composantes individuelles telles que l'étalon et la cavité. Un programme additionnel doit être en opération durant les manipulations pour récolter les résultats de mesure de l'ondemètre dans la cavité de référence. Ces mesures sont ensuite prises en compte durant la stabilisation de la longueur d'onde d'émission du SolsTiS.

5 Mise en place des protocoles de mesures automatisés à partir du programme d'acquisition spécialisé

L'objectif principal de ce projet est d'adapter les techniques de caractérisation I-V modernes afin d'étudier les attributs d'un convertisseur de puissance laser. Pour ce faire, un laser accordable et un support à échantillon rotatif ont été ajoutés au montage expérimental. Par contre, le simple ajout d'équipement n'est pas suffisant pour effectuer des séries de mesures précises, reproductives et rapides. Au départ, le processus de mesure prenait plus de temps puisqu'il fallait configurer manuellement chaque source de puissance en plus de changer le laser pour modifier la longueur d'onde incidente. C'est pour ça qu'une portion du projet est dédiée au développement d'un programme d'acquisition Labview permettant d'automatiser les manipulations.

5.1 Connexion entre l'ordinateur et le montage

Tout d'abord, plusieurs type de connexions différentes sont utilisées afin d'établir la communication entre l'ordinateur et les instruments de mesure. Certains équipements ont plusieurs ports de communication tandis que d'autres imposent un type de connexion spécifique. En pratique, la bande passante des standards de communication moderne est suffisamment élevée pour gérer la quantité d'informations en circulation durant une série de mesure. La contrainte principale à considérer durant le choix du type de connexion à utiliser se situe au niveau des ports disponibles sur l'ordinateur. L'ordinateur possède un port Ethernet et deux ports USB dont un qui est connecté à un moniteur avec quatre autres ports USB.

Le Keithley 2601B, le Keithley 2510 et le Sorensen DLM 20-30 sont tous connectés à l'ordinateur à partir de câbles GPIB (*General Purpose Interface Bus*). Le standard GPIB, aussi nommé IEEE-488, est un bus de communication parallèle spécialisé dans le transfert de données à courte distance. Les connecteurs GPIB peuvent être enchaînés d'une machine à l'autre, réduisant le nombre de ports nécessaires. Le DLM 20-30, le Keithley 2510 et le Keithley 2601B sont connectés en chaîne et un seul adaptateur GPIB-USB est nécessaire pour établir la connexion avec l'ordinateur portable. La connexion entre l'ordinateur portable et un des Ice-Blocs est faite à partir d'un seul câble Ethernet. Les Ice-blocs peuvent aussi communiquer entre eux avec des connexions Ethernet. L'ordinateur peut donc communiquer avec chaque Ice-Bloc à partir d'une seule connexion Ethernet. Des connexions USB sont utilisées pour communiquer avec le Rhode & Schwartz HMP2020, le Angstrom WS6-600, le Newport 843-R-USB et l'Arduino Uno.

5.2 Communication avec le programme d'acquisition Labview

Le langage de programmation Labview, développé par National Instruments, est conçu pour faciliter la création d'une interface graphique pour communiquer avec des appareils de mesure. Plusieurs fabricants d'instruments de mesure, comme Tektronix et Arduino, peuvent fournir des pilotes de contrôle déjà compatibles avec Labview afin d'accélérer le processus d'automatisation. De plus, certains modules de programmation sont souvent disponibles pour les tâches simples comme ouvrir/fermer l'instrument ou changer les paramètres d'affichage. Ces ressources permettent d'établir rapidement la communication avec le mon-

tage avant même de se préoccuper des détails concernant les manipulations. Lorsqu’aucun pilote n’est disponible, comme dans le cas du SolsTis, la communication se fait à partir de modules Labview déjà compatibles avec les standards de communication modernes tels que USB, GPIB et TCP-IP.

Une série de commandes est généralement envoyée à un instrument de mesure sous forme de script. Pour être exécuté, un script doit respecter la syntaxe propre au langage du micro-programme (*Firmware*) installé sur l’appareil de mesure. Par exemple, le micro-programme des instruments Keithley est basé sur le langage Lua tandis que celui de l’Arduino est basé sur C/C++. Lorsqu’un instrument est déjà muni de pilotes de contrôle et de modules de programme compatibles avec Labview, plusieurs exemples de scripts sont disponibles pour mieux comprendre les fonctionnalités de l’appareil. Tous les appareils sont accompagnés de manuels de référence permettant de créer des scripts personnalisés avec la syntaxe appropriée.

5.3 Programme d’acquisition Labview

5.3.1 Interface graphique

Le programme d’acquisition Labview permet d’effectuer plusieurs types de mesure en plus d’offrir des outils d’analyse de données avancées. Bien que l’objectif du projet est d’adapter et d’automatiser le montage expérimentale actuel, une attention particulière est aussi accordée à l’expérience de l’usager durant le développement du programme. Les avantages principaux de l’automatisation sont d’augmenter le rendement d’un système en réduisant la durée des manipulations et de minimiser l’interaction nécessaire entre l’usager et l’instrumentation. Cela a comme effet de réduire la possibilité d’erreurs du côté de l’usager en plus d’améliorer la reproductibilité des mesures. Par contre, il est aussi possible d’augmenter l’efficacité le système en optimisant l’interface du programme. En limitant la quantité d’informations affichées aux contrôles et aux résultats pertinents aux types de mesures effectuées, le temps d’interaction entre l’usager et le programme peut être diminué. De plus, le programme peut contenir des fonctionnalités avancées et des outils d’analyse en arrière-plan sans encombrer l’écran. Idéalement, un usager doit pouvoir comprendre le fonctionnement du programme de façon intuitive et rapide.



FIGURE 5.1 – Interface principal du programme d'acquisition Labview

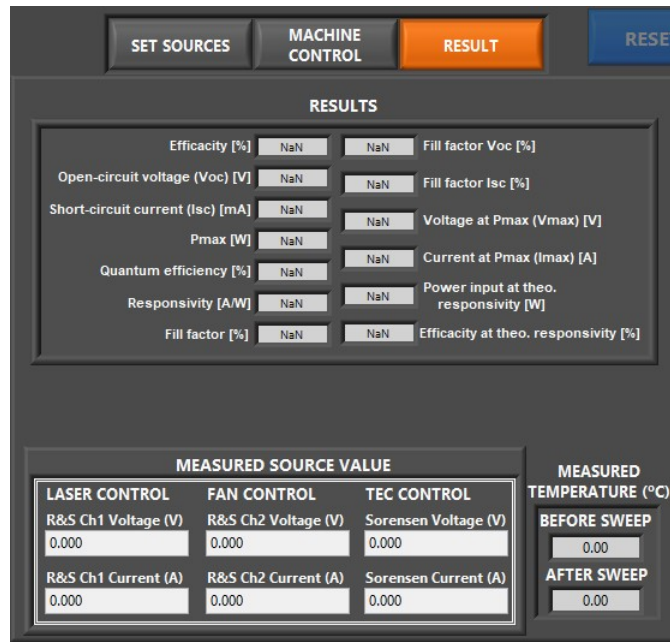


FIGURE 5.2 – Affichage des résultats.

L'interface principal (fig. 5.1) comprend tous les contrôles nécessaires pour débuter une mesure. Après le lancement d'une mesure, la portion de l'interface réservée au contrôle des sources laser est remplacée par une section affichant les résultats obtenus (fig. 5.2). Seuls les résultats de la dernière mesure I-V sont affichés à l'écran. Les résultats sont mis à jour dès que l'information est disponible. L'utilisateur peut quand même retourner voir les paramètres d'entrées associés aux sources lasers à n'importe quel moment. Le programme affiche aussi les résultats sous forme de graphiques au bas de l'interface. L'utilisateur peut naviguer entre les graphiques de courant-tension, puissance-tension et résistance-tension en plus de pouvoir

positionner un curseur pour afficher les coordonnées correspondantes. Un maximum de six courbes peuvent être affichées à tout moment et un code de couleur modifiable par l'utilisateur est utilisé pour les différencier (fig. 5.3).

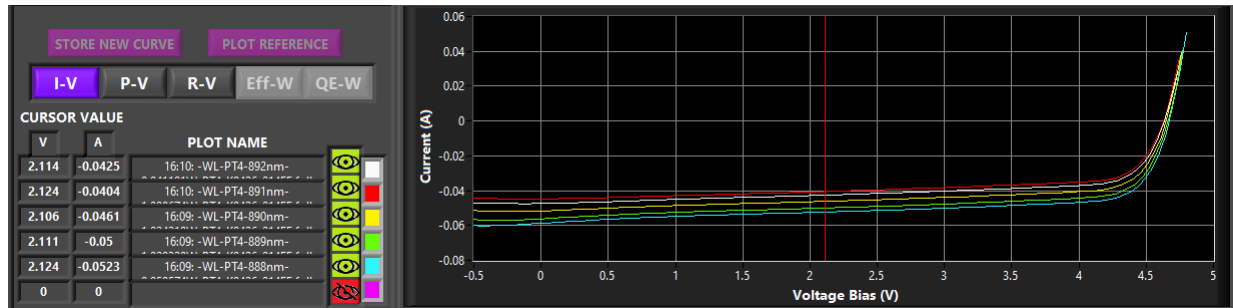


FIGURE 5.3 – Portion de l'interface consacrée à l'affichage des résultats. Les courbes correspondantes aux six dernières mesure I-V sont affichées de manière automatique lors d'une série de mesure.

5.3.2 Mesure I-V simple

La mesure I-V est au coeur de tous les protocoles de caractérisation disponibles dans le programme. La source de lumière utilisée, la présence d'un système de refroidissement, l'utilisation d'un support rotatif et le suivi de la température sont tous des paramètres pouvant être modifiés durant une séance de caractérisation. L'exécution d'une mesure I-V consiste initialement à créer le script qui est envoyé au Keithley 2601B. Pour ce faire, l'utilisateur doit d'abord insérer la valeur de la tension de départ et celle à la fin du balayage en plus d'indiquer la valeur de l'incrément en tension. Si désiré, le programme peut assigner automatiquement la valeur du Voc à celle de la tension finale en effectuant une mesure rapide avant l'envoi du script. Afin de protéger le dispositif, l'utilisateur peut poser manuellement une valeur de compliance de courant ou encore insérer un facteur multiplicatif et laisser le programme assigner une valeur correspondante à :

$$Compliance = Facteur \times \frac{P_{entrée}}{V_{open-circuit}} \quad (10)$$

Les paramètres du script doivent être accompagnés d'informations supplémentaires avant de pouvoir commencer la mesure. Ces données sont utilisées durant l'analyse des données recueillies après la mesure I-V. Lorsque les caractéristiques de la source de lumière ne sont pas déjà incorporées au programme, l'utilisateur doit insérer manuellement une valeur correspondante à la puissance d'entrée. Le même principe s'applique aux caractéristiques propres au type de dispositif à l'étude. L'utilisateur doit insérer une valeur pour le nombre de jonctions p/n comprises dans le phototransducteur, le Voc estimé et l'efficacité quantique théorique. Un menu déroulant permet aussi de choisir parmi une liste prédéfinie de dispositifs afin d'assigner automatiquement des valeurs aux paramètres mentionnés ci-haut.

Le programme est conçu pour empêcher l'utilisateur de débiter une mesure sans avoir fourni toutes les informations nécessaires. Le bouton permettant de lancer une mesure est grisé et non-interactif tant que les conditions de départ ne sont pas respectées. Une liste des critères manquants se trouve sous le bouton de démarrage pour faciliter le processus. Par exemple, seule une mesure I-V sans illumination peut être effectuée à partir des paramètres décrits plus haut puisque les sources de lumière n'ont pas été configurées. Dans ce cas, il faut activer le mode *DARK* avant de lancer la mesure.

5.3.3 Mesure I-V sous illumination

Les protocoles de mesure I-V sous illumination sont d'abord conçus pour protéger les échantillons à l'étude et pour éviter les accidents durant les manipulations. Pour ce faire, l'exposition du dispositif est limité au strict minimum durant une mesure. Dans le cas des lasers monochromatiques, les sources d'alimentation sont activées juste avant le départ de la mesure I-V et elles sont désactivées immédiatement après. Pour ce qui est du laser accordable, c'est l'ouverture et la fermeture de l'obturateur qui sont effectuées près de la mesure I-V. De cette façon, l'augmentation de la température de l'échantillon est contrôlée et la reproductibilité des mesures est accrue. De plus, la fermeture rapide des sources d'alimen-

tation et l'arrêt de la propagation du faisceau laser permet de mitiger les dangers liés aux manipulations du montage.

Le programme offre deux types de protocoles de mesure selon la source de puissance laser utilisée. Pour effectuer une mesure I-V avec un laser monochromatique, il faut d'abord indiquer au programme les paramètres de sortie des sources de puissance. Ces lasers sont alimentés par le Rhode & Schwartz HMP2020 et nécessitent parfois l'utilisation du Sorensen DLM 20-30 pour alimenter la ventilation. Le programme contient une liste de chartes de calibration associée aux lasers monochromatiques du montage. L'utilisateur peut donc choisir un laser et une puissance de sortie afin de laisser le programme assigner automatiquement des paramètres pour les sources de puissance. Cette méthode attribue aussi des valeurs pour la longueur d'onde d'émission et la puissance d'entrée afin d'effectuer l'analyse des données. Chaque valeur peut aussi être entrée manuellement dans le cas où le laser n'est pas enregistré dans le programme. Le protocole consiste initialement à ouvrir les sources d'alimentation connectés aux diodes laser et à leur système de refroidissement. L'alimentation des différentes composantes doit être simultanée puisqu'une augmentation ou une diminution trop rapide de la température peut endommager la diode laser. La mesure I-V est ensuite effectuée avant de fermer toutes les sources d'alimentation. Finalement, le programme analyse et sauvegarde les données obtenues durant la mesure.

Les paramètres de mesure du protocole incluant le SolsTiS ne peuvent pas tous être entrés à partir de l'interface du programme. En effet, la puissance de la diode laser ne peut être modifiée qu'à partir de l'interface web fournie par MSquared. Par contre, la longueur d'onde d'émission du SolsTiS peut être contrôlée à partir de commandes compatibles avec Labview. L'utilisateur doit donc définir la longueur d'onde d'émission tandis que la puissance d'entrée est déterminée durant la mesure. Tout d'abord, la mesure débute avec la commande pour changer la longueur d'onde d'émission du SolsTiS. Durant cette étape, la longueur d'onde et la puissance de sortie du laser peuvent fluctuer de manière importante avant de se stabiliser. C'est pour ça qu'un délai est introduit dans le protocole pour s'assurer que les paramètres du faisceau laser ne varient pas durant la mesure I-V. Puisque certaines transitions prennent plus de temps avant de stabiliser la longueur d'onde, le délai n'est pas constant sur tout le spectre (section 6.2). Une mesure de la puissance de la lumière sortant du système est effectuée à partir du wattmètre avant de lever l'obturateur de faisceau. Ensuite, le protocole de mesure I-V est exécuté et l'obturateur retourne à sa position initiale. Une seconde mesure de la puissance du faisceau quittant le système est réalisée avec le wattmètre avant de terminer le protocole avec l'analyse et la sauvegarde des données. La puissance d'entrée utilisée durant l'analyse est déterminée à partir de la valeur moyenne entre les deux résultats de mesure du wattmètre et du ratio expérimental obtenu durant le projet (section 6.1).

5.3.4 Analyse des résultat et fichier de sauvegarde

Les données et les résultats d'analyse recueillies durant une mesure sont regroupés dans un fichier de sauvegarde en format *.txt*. Le nom du fichier est assigné automatiquement par le programme à partir des informations entourant la mesure et le type d'échantillon. L'entête du fichier contient l'emplacement du fichier sur l'ordinateur, la date de la mesure et les commentaires laissés par l'utilisateur. Ensuite, les paramètres de mesure sont énumérés de manière à établir un contexte autour des résultats obtenus. Les tension initiales et finales de la mesure I-V et la valeur de l'incrémentations en tension sont toutes présentes dans les fichiers.

La section suivante concerne l'analyse des données effectuées par le programme suite à la mesure I-V. Le module d'analyse du programme utilise les équations suivantes pour obtenir les résultats désirés :

$$Efficiency = \frac{100 P_{max}}{P_{input}} \quad [\%] \quad (11)$$

$$Fill Factor = \frac{100 P_{max}}{I_{sc} V_{oc}} \quad [\%] \quad (12)$$

$$Fill Factor V_{oc} = \frac{100 V_{at max power}}{V_{oc}} \quad [\%] \quad (13)$$

$$Fill Factor I_{sc} = \frac{-100 I_{at max power}}{I_{sc}} \quad [\%] \quad (14)$$

$$Responsivity = \frac{-N_{epitaxial layer} I_{sc}}{P_{input}} \quad \left[\frac{A}{W}\right] \quad (15)$$

$$Quantum Efficiency(\%) = \frac{1239.85 Responsivity}{\lambda[mm]} \quad [\%] \quad (16)$$

$$Power input_{theo. responsivity} (W) = \frac{I_{sc} N_{epitaxial layer}}{Theoretical responsivity} \quad [W] \quad (17)$$

$$Efficiency_{theo. responsivity} (\%) = \frac{100 P_{max}}{Power input_{theo. responsivity}} \quad [\%] \quad (18)$$

Le fichier de sauvegarde contient les paramètres d'entrées afin de donner le plus d'informations possible à l'utilisateur durant son analyse (voir fig. 5.4). Cela fait en sorte qu'il est plus facile d'identifier la source du problème lorsqu'un résultat semble aberrant. Les données recueillies durant la mesure I-V sont énumérés dans des colonnes à la fin du fichier. Les deux premières colonnes contiennent les valeurs de tension et de courant propres à la mesure I-V. Les deux autres colonnes contiennent les valeurs de puissance et de résistance calculées à partir des valeurs de tension et de courant.

```

File saved as: C:\Users\VM Squared\Desktop\I-V MEASUREMENT 19 septembre 2019\Result Data\PT4-I1700-043FS
Date and time: 09/27/2019 17:45
Comments: no comments

I-V SWEEP COMMANDS:
WL Start voltage [V]: -0.5
WL Voltage step [V]: 0.05
WL Stop voltage [V]: 4.813298

WAVELENGTH SWEEP COMMANDS:
Initial Wavelength: 850
Wavelength Increment: 0.5
Target Wavelength: 900

INFORMATIONS:
Compliance [A]: 0.215822
Theoretical quantum efficiency [%]: 93.5
Theoretical responsivity [A/W]: 0.641005
Device Epitaxial Layers: 4

ANALYSIS
Efficiency [%]: 48.700
Input power [W]: 0.844627

Open-circuit voltage Voc [V]: 4.773298
Short-circuit current [mA]: 115.821770
Maximal power (Pmax) [W]: 0.411335
Voltage at maximum power (Vmax) [V]: 4.312740
Current at maximum power (Imax) [A]: -0.095377

Quantum Efficiency [%]: 79.821
Responsivity [A/W]: 0.548511

Fill factor [%]: 74.402
Fill factor voltage [%]: 90.351
Fill factor current [%]: 82.348

Power input at theoretical Responsivity [W]: 0.722751
Efficacy at theoretical Responsivity [%]: 56.912443

DATA
Voltage [V] Current [A] Power [W] Resistance [Ohms]
-0.500000 -1.175170E-1 5.875850E-2 3.769491E+3
-0.449867 -1.176220E-1 5.291426E-2 2.923205E+3
-0.399735 -1.174000E-1 4.692889E-2 1.053234E+3
-0.349602 -1.168850E-1 4.086323E-2 6.423291E+2
-0.299469 -1.165270E-1 3.489622E-2 4.620618E+2

```

FIGURE 5.4 – Exemple de fichier de sauvegarde suite à une caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde

5.3.5 Caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence

Le protocole de mesure permettant d'effectuer une caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde comprend quelques étapes additionnelles en comparaison à la mesure I-V simple. Tout d'abord, l'utilisateur doit indiquer au programme les longueurs d'onde initiales et finales du balayage en plus de la valeur de l'incrément. Actuellement, un balayage peut couvrir tous les spectres d'émission du laser, de 725 nm à 960 nm, avec une incrément minimale de 0.5 nm. Après avoir effectué la première mesure, le programme démarre une nouvelle mesure avec une longueur d'onde d'émission plus élevée. Lorsque la longueur d'onde finale est atteinte, le programme génère un dossier afin de regrouper les résultats de toutes les mesures I-V. De plus, un fichier de sauvegarde sommaire est généré à la fin du protocole afin de récapituler les résultats obtenus pour chaque longueur d'onde. La première colonne contient la longueur d'émission et les autres colonnes les résultats d'analyse tels que l'efficacité, le Voc, le Isc et la puissance d'entrée. Le fichier sommaire facilite la création de graphiques démontrant la corrélation entre la longueur d'onde et les performances I-V.

Le protocole de caractérisation I-V en fonction de l'angle d'incidence et celui en fonction de la longueur d'onde d'émission sont similaires. Le programme exécute une mesure

I-V avant de faire tourner le support d'un angle prédéfini par l'utilisateur et de recommencer la mesure pour un autre angle. Le protocole se termine lorsque l'angle final, aussi déterminé par l'utilisateur, est atteint. Les résultats sont regroupés dans un fichier généré par le programme et un fichier sommaire est produit. La première colonne du fichier sommaire contient l'angle d'incidence et les résultats d'analyse sont inclus dans les autres colonnes.

5.4 Fonctionnalités supplémentaires

5.4.1 Contrôle avancé des instruments

Le programme est muni de fonctionnalités facilitant le diagnostic des problèmes associés aux instruments de mesure. Tout d'abord, une section de l'interface est consacrée à valider les paramètres de connexions utilisés. Labview utilise un système de ressource VISA (*Virtual Instrument Software Architecture* pour différencier les instruments de mesure. Les appareils connectés via USB et GPIB reçoivent donc un identifiant unique pour faciliter la programmation. Au démarrage du programme, l'initialisation des paramètres accorde une valeur par défaut à toutes les ressources VISA connues et Labview effectue un test de connexions. Les paramètres de connexions peuvent être modifiés manuellement si la connexion avec un instrument est impossible.

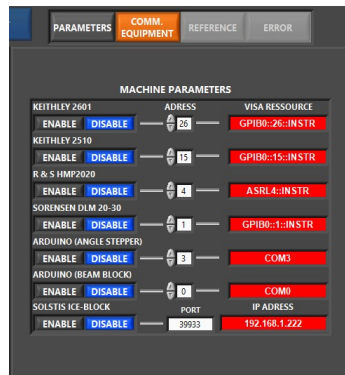


FIGURE 5.5 – Interface de communication avec l'instrumentation

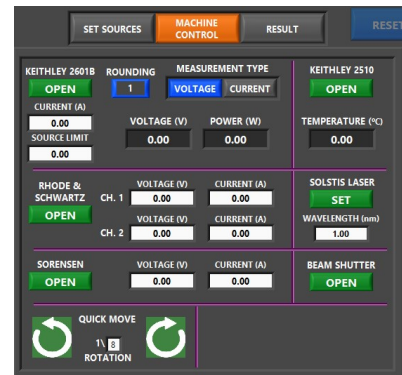


FIGURE 5.6 – Interface de contrôle de l'instrumentation

Une autre section de l'interface est dédiée à l'envoi de commandes simples aux instruments du montage. Une série de contrôles permettent d'effectuer des mesures continues de courant, de tension et de température en plus d'activer les différentes sources d'alimentation. L'interface peut faire déplacer l'obturateur de faisceau ainsi que faire tourner le moteur pas-à-pas dans chaque direction. Le programme peut donc être utilisé en tant que pilote simple lorsqu'une mesure I-V complète n'est pas nécessaire.

6 Calibration du montage et caractérisation des convertisseurs de puissance laser

6.1 Coefficient de proportionnalité Pévac-Pfibre

Le SolsTiS ne possède pas de module pour mesurer la puissance du faisceau à la sortie de la fibre. En réalité, il est difficile d'intégrer une telle fonctionnalité sans compromettre l'efficacité du système. En effet, cette mesure implique qu'une portion, ou parfois la totalité, du faisceau est interceptée par un wattmètre, ce qui réduit la puissance de sortie et augmente la complexité du système.

La méthode utilisée actuellement consiste à mesurer la puissance du faisceau rejeté par le SolsTiS. Juste avant d'entrer dans la fibre à la sortie, le faisceau est séparé en deux et une portion de la puissance est expulsée du système par une ouverture sur le côté du boîtier. La proportion de la puissance éjectée est contrôlée à partir d'un polariseur linéaire à l'entrée du module. Un coefficient de proportionnalité expérimental est employé pour calculer la valeur de la puissance à la sortie de la fibre à partir de la mesure obtenue avec le wattmètre.

Tout d'abord, la position du polariseur à l'entrée du module est ajustée de sorte qu'environ 10% de la puissance lumineuse atteigne le wattmètre. Bien qu'il serait préférable d'exploiter toute la puissance du laser, le signal intercepté par le wattmètre doit être assez élevé pour réduire le bruit sur la mesure. Avec une précision de $\pm 0.25\%$ de la pleine échelle (3 à 6 watts), la mesure de puissance a trois chiffres décimaux significatifs et le bruit est minimal pour les puissances d'entrées supérieures à 0.1 watt. Dans le cadre expérimental actuel, le SolsTiS est utilisé pour générer des faisceaux avec des puissances se situant entre 1 et 3.5 watts. Une distribution 90%-10% de la puissance entre la fibre et le wattmètre est donc idéale pour réduire le bruit sur la mesure et maximiser la puissance de sortie du laser.

Dans le cas du Solstis actuel, une distribution de puissance approximative de 88%-12% est obtenue avec un angle de polarisation de 138° . La stabilité de cette distribution est ensuite étudiée en faisant varier la longueur d'onde d'émission et la puissance de sortie de la pompe optique Equinox. Avec seulement un wattmètre, les mesures de puissance au bout de la fibre et devant l'ouverture d'évacuation doivent être effectuées séparément. Les puissances de sortie sont mesurées sur un spectre de longueurs d'onde situé entre 720 nm et 930 nm par incrément de 5 nm. Une série de mesures similaires est effectuée à partir de la pompe optique pour les puissances suivantes : 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17 et 18 watts. Idéalement, l'évolution de la puissance de sortie au bout de la fibre devrait être linéairement proportionnelle à celle de la puissance à l'ouverture d'évacuation. En d'autres mots, un coefficient de corrélation d'une valeur se rapprochant de 1 signifie que le coefficient Pévac-Pfibre est valide sur toute la gamme de longueurs d'onde et pour chaque puissance de diode. Ce coefficient est extrait à partir d'un graphique qui met en relation les valeurs de puissance au bout de la fibre ainsi que les valeurs de puissance à l'ouverture d'évacuation. La fig. 6.1 révèle que le ratio entre les deux puissances est assez stable sur tout le spectre de longueur d'onde et de puissance de diode. Avec un coefficient de détermination $R^2 = 0.9943$, l'utilisation d'un coefficient

de proportionnalité P_{évac}-P _{fibre} fixe s'avère être appropriée peu importe les paramètres de mesure.

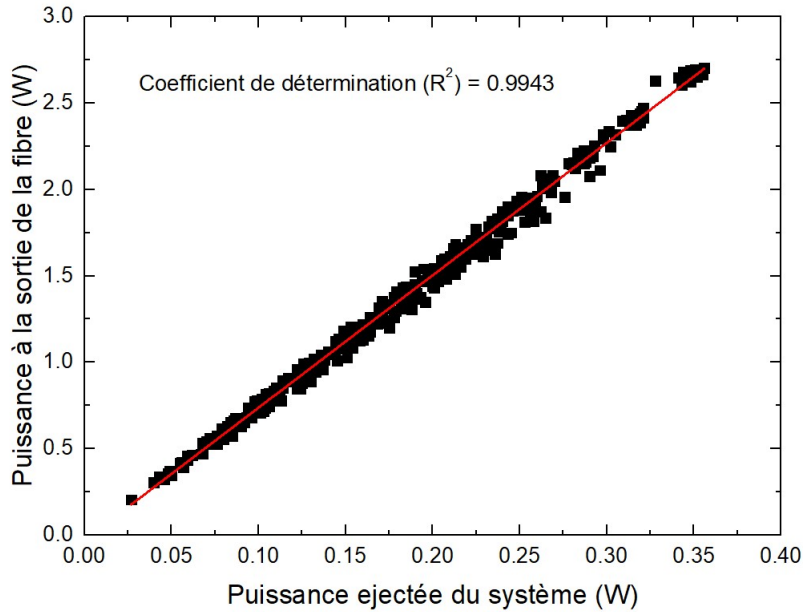


FIGURE 6.1 – Représentation graphique de la corrélation entre la puissance de sortie à l'extrémité de la fibre et la puissance éjectée du système.

Afin d'évaluer la stabilité du système au fil du temps, des mesures de la puissance de sortie et de la longueur d'onde d'émission ont été effectuées à intervalles de 5 minutes pendant un total de 45 minutes (fig 6.2). La puissance de la diode laser est posée à 12.5 watts et le laser émet à une longueur d'onde de 780 nm. La mesure de puissance est effectuée à partir du wattmètre mentionné plus tôt et la longueur d'onde est évaluée de manière automatique et continue par l'ondemètre lorsque le laser est en fonction. Les fluctuations en puissance les plus importantes sont observées durant les 10 premières minutes où une hausse d'environ 3% est mesurée. Les 30 minutes suivantes sont représentées par un plateau avec des variations en puissance négligeables d'environ $\pm 0.4\%$. Durant les mesures, la valeur de la longueur d'onde d'émission a augmenté de manière continue avec un taux d'environ 0.00005 nm/minute. Ces résultats indiquent que les fluctuations en puissance et en longueur d'onde peuvent être négligés lorsque les mesures I-V sont effectuées rapidement. Dans le cas du montage actuel, les effets nuisibles de ces variations sont diminués parce qu'il est possible d'effectuer plus de 2 mesures I-V par minute (section 6.2).

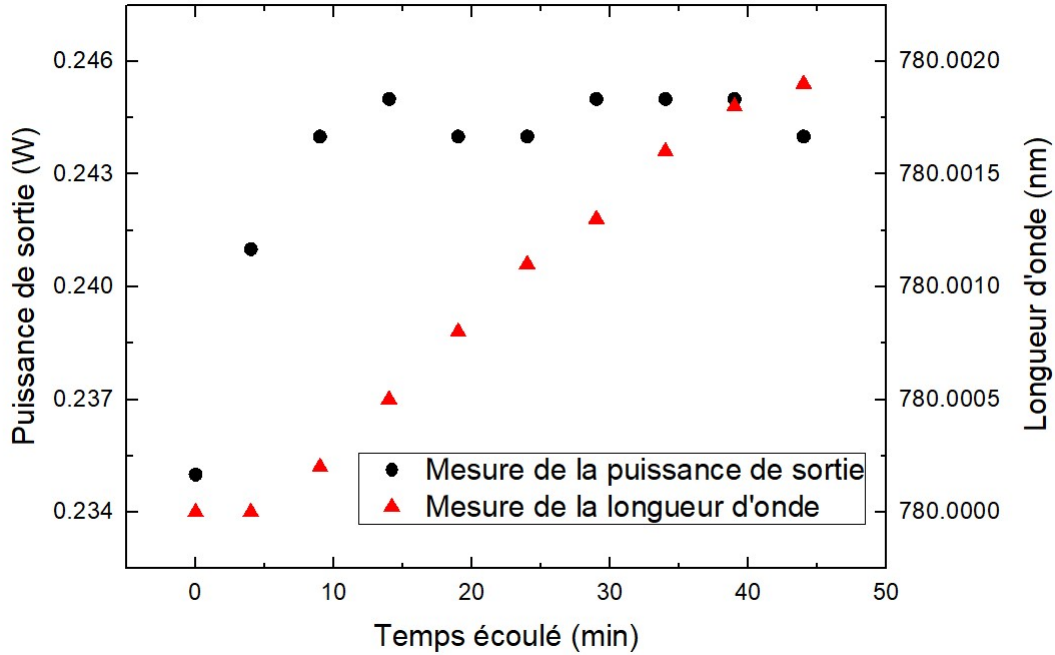


FIGURE 6.2 – Évaluation de la stabilité de la puissance de sortie du laser et de la longueur d’onde d’émission en fonction du temps. Sans modification des paramètres de l’expérience, la puissance de sortie se stabilise après environ 10 minutes tandis que la valeur de la longueur d’onde d’émission dérive de manière continue au fil du temps.

6.2 Puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d’onde d’émission

Les premières étapes de calibration ont indiqué que la puissance de sortie du laser variait en fonction de la longueur d’onde d’émission. En pratique, des fluctuations aléatoires de la puissance de sortie durant une série de mesures I-V signifie qu’il est impossible d’avoir des résultats reproductibles pour un même échantillon. Afin de déterminer si ce comportement est attendu ou est causé par une instabilité dans le système, une caractérisation des performances du laser à différentes longueurs d’onde a été effectuée. Chaque mesure de puissance utilise le coefficient de proportionnalité déterminé dans la section précédente pour estimer la puissance qui atteint l’échantillon.

Tout d’abord, à l’aide des protocoles introduits au programme d’acquisition, des mesure automatiques de la puissance de sortie du laser sur tout le spectre d’émission du laser ont été effectuées. Pour ces mesures, la puissance de la diode laser est posée à 11 watt et le spectre est couvert par incrément de 2 nm et 5 nm. Les courbes obtenues (fig. 6.3) révèlent plusieurs régimes de puissance réparties sur le spectre. Ces régimes affectent principalement la puissance de sortie du laser, mais aussi la vitesse à laquelle le système est capable de stabiliser la longueur d’onde d’émission. Le premier régime comprend les longueurs d’onde entre 720 nm et 820 nm où la région autour de 780 nm correspond au rendement maximal du laser. L’oxygène présent dans la cavité a un spectre d’absorption autour de 760 nm qui est représenté par une diminution de puissance sur la courbe et une augmentation significative

du temps de stabilisation. Généralement, l'ondemètre et l'étalon n'ont pas besoin de plus de 5 secondes pour stabiliser la longueur d'onde, mais un délai de 15 secondes est accordé au système lors des transitions problématiques. Bien qu'il soit préférable de réduire la durée de chaque mesure, il est d'autant plus important que la longueur d'onde ne varie pas durant une mesure I-V. La transition entre les deux premiers régimes se situe à 820 nm, où le mécanisme interne dans la cavité doit se repositionner avant de fournir le reste du spectre. Cette transition est marquée par une baisse de puissance et par un temps de stabilisation plus élevé. Le troisième régime de puissance comprend le spectre entre 880 nm et 950 nm. Cette région est caractérisée par des délais supplémentaires lors de la stabilisation de la longueur d'onde qui sont causés par le spectre d'absorption de la vapeur d'eau dans la cavité. Tout comme pour la région autour de 760 nm et celle à 820 nm, le système peut prendre jusqu'à 15 secondes avant de se stabiliser.

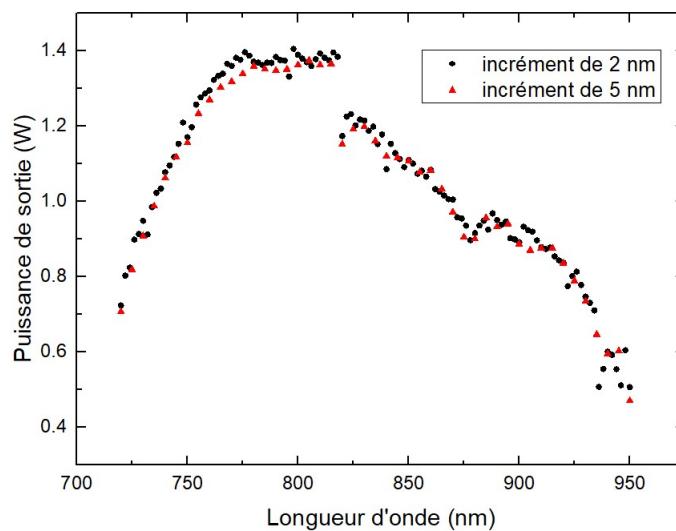


FIGURE 6.3 – Graphique de la puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission.

Étant donné la baisse de puissance importante à 820 nm, la région a été étudiée plus en détails. Pour ce faire, plusieurs mesures de puissance ont été effectuées sur le spectre de 790 nm à 850 nm où la puissance de la diode laser est posée à 11 watts. Les résultats (fig. 6.4) indiquent que la puissance de sortie diminue d'une valeur moyenne de 0.16 watt. Par contre, l'atténuation peut varier de manière significative comme dans le cas de la courbe rose où une baisse de puissance de 0.12 watt est enregistrée. De plus, une instabilité au niveau de la puissance est apparente, particulièrement dans la région entre 790 nm et 820 nm.

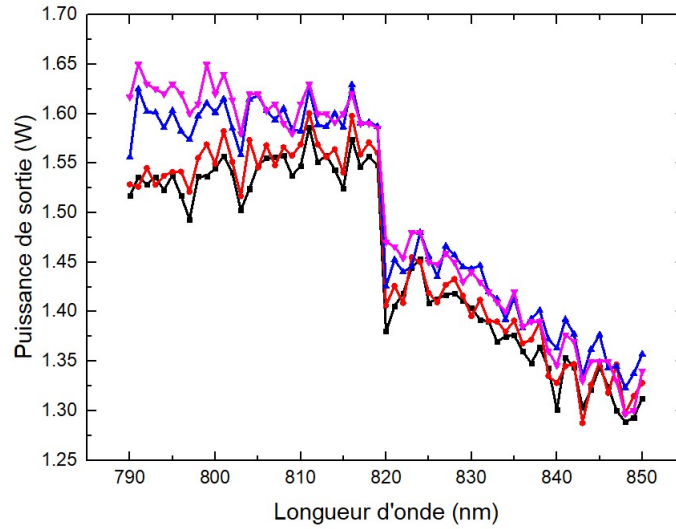


FIGURE 6.4 – Graphique de la puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission autour de la zone de transition à 820 nm.

Finalement, une série de mesures similaires de 800 nm à 850 nm a été conduite en faisant varier la puissance de la diode laser. L'intention est d'évaluer si le comportement du laser autour de 820 nm est semblable à ce qui est observé à de plus hautes puissances. La fig. 6.5 indique que le rendement du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission n'est pas affecté de façon significative par la puissance de la diode.

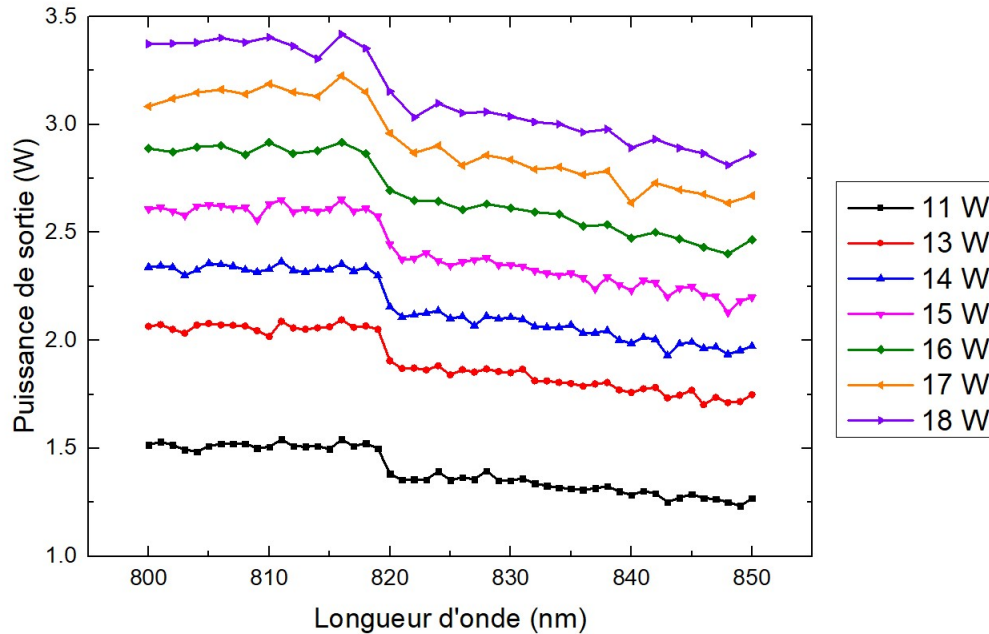


FIGURE 6.5 – Graphique de la puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission autour de la zone de transition à 820 nm.

Les résultats ci-haut indiquent que les régimes de puissance sont bien définis et que les délais de stabilisation de la longueur d'onde sont prévisibles. Cela signifie que les protocoles de mesures automatiques peuvent être optimisés de manière à laisser au système le temps nécessaire à se stabiliser tout en minimisant la durée des mesures. Par contre, les fluctuations observées dans les fig. 6.4 et 6.5 soulignent l'importance d'évaluer la puissance avant chaque mesure I-V. Il n'est pas possible de réduire la durée d'une séance de calibration en employant une courbe de calibration expérimentale. Les variations en puissance combinées à la dégradation du signal décrite dans la section suivante impose qu'une mesure de puissance soit faite à chaque mesure I-V afin d'obtenir des résultats plus représentatifs des performances réelles des phototransducteurs. Avec de telles contraintes, le montage actuel a la capacité d'effectuer plus de 430 mesures I-V dans un intervalle de temps de 2 heures et 30 minutes sans brusquer la stabilisation de la longueur d'onde.

6.3 Maintenance du SolsTiS

L'utilisation prolongée du montage de caractérisation en fonction de la longueur d'onde a révélé une diminution graduelle de la puissance de sortie du laser accordable au fil du temps. Bien que ce phénomène ait débuter dès la première séance de mesures, il a été difficile d'identifier la cause sans avoir préalablement déterminé le comportement normal du laser. Lorsque assez de mesures ont été effectuées, une comparaison des graphiques de puissance de sortie en fonction de la longueur d'onde d'émission pour plusieurs échantillons a dévoilé que la puissance de sortie du laser diminue constamment. Une revue de la documentation du laser et une discussion avec un représentant de MSquared a confirmé que certaines étapes de maintenance sont essentielles pour optimiser la puissance de sortie du système. Afin d'illustrer la dégradation du signal de sortie, un graphique comparant les courbes de puissance de sortie en fonction de la longueur d'onde pour plusieurs séances de caractérisation utilisant les mêmes paramètres de mesure a été construit. La fig. 6.6 contient quatre courbes obtenues entre le 25 septembre et le 10 octobre où la puissance de la diode laser est posée à 11 watts. Comme mentionné dans la section 5.3.5, ces graphiques sont formés à partir des données du fichier sommaire généré par le programme d'acquisition. Les valeurs d'entrée sont calculées à partir de la puissance mesurée par le wattmètre et du coefficient expérimental décrit en section 6.1. Bien que la puissance de la diode soit identique pour chaque série de mesure, la puissance de sortie du laser subit une diminution d'environ 0.3 à 0.5 watt selon la longueur d'onde d'émission. Étant donné que les dispositifs photovoltaïques à l'étude sont conçus pour soutenir et convertir des puissances laser plus élevées, il est nécessaire d'assurer le fonctionnement optimal du système.

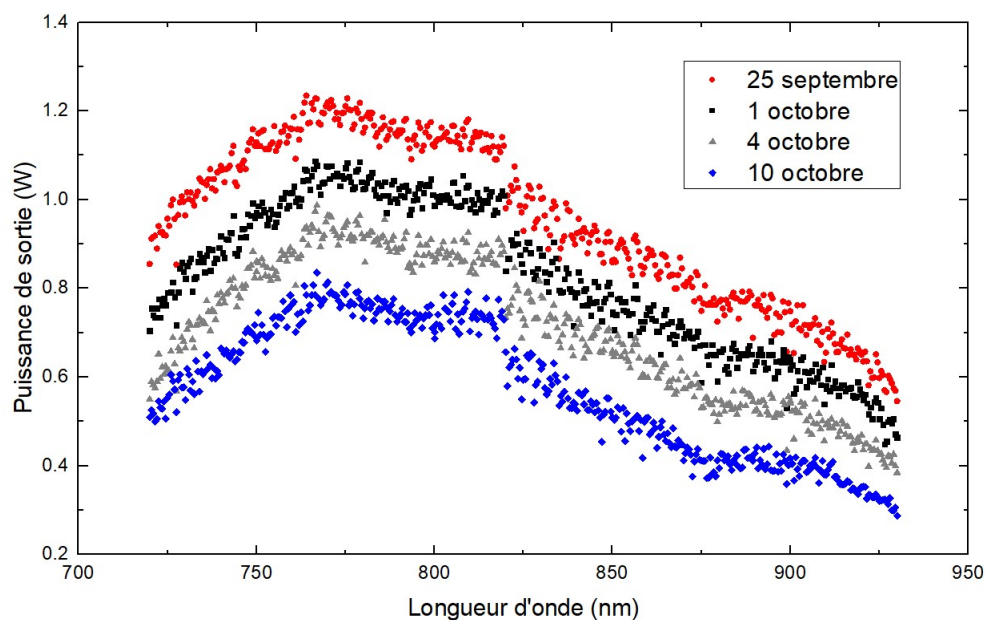


FIGURE 6.6 – Représentation graphique de la perte de puissance de sortie du laser accordable au fil du temps.

Le laser accordable est un système complexe nécessitant un entretien régulier afin d'assurer son bon fonctionnement. En effet, il est nécessaire d'effectuer quelques étapes de maintenance afin d'optimiser la puissance de sortie du SolsTiS. Tout d'abord, l'humidité à l'intérieur de la cavité du SolsTiS augmente au fil du temps et l'introduction de particule d'eau ne fait qu'intensifier l'absorption de la lumière. Pour remédier à la situation, une cartouche de dessiccation (fig. 4.11 D) est positionnée sur le dessus du boîtier de la cavité du SolsTiS. La déshumidification se fait de manière passive et il faut remplacer manuellement la cartouche à chaque 2-3 mois. MSquared a fourni deux cartouches afin de toujours en avoir une en fonction pendant que les préparations se fassent avec l'autre. Avant d'être utilisée, la cartouche de rechange doit d'abord être rechargée en la faisant chauffer à 120 °C pendant 3 heures. Ce processus devrait être suffisant pour retirer toutes traces d'eau dans la cartouche. Ensuite, il suffit simplement de retirer la cartouche humide du laser et de la remplacer par la cartouche sèche.

Le parcours emprunté par le faisceau est défini par un ensemble de miroirs, de polariseurs, de lentilles et de séparateurs de faisceau. Un désalignement des miroirs peut faire dévier une portion du faisceau hors du parcours optique, ce qui réduit la puissance à la sortie de la fibre. Ce problème est évité en employant les deux méthodes d'alignement implémentées par MSquared. L'alignement plus grossier se fait à partir de deux thumbscrews situés sur le bord du module acheminant le faisceau de la pompe Equinox jusqu'à la cavité SolsTiS (fig. 4.11 B). Un wattmètre est placé au bout de la fibre pour mesurer la puissance de sortie après avoir ajuster la position des miroirs. Il est important de laisser la lecture de la puissance se stabiliser entre chaque ajustement pour éviter de "manquer" la cible. Ensuite, un réglage

plus précis est effectuer de façon automatique grâce à l'option *One-Shot* disponible sur l'interface web de MSquared. Le processus d'alignement est court et il est préférable de faire cet ajustement avant de chaque séance de mesure.

Une portion considérable de la puissance de sortie peut être récupérée suite aux étapes de maintenance décrites plus haut. La comparaison entre la dernière séance de mesures et celles conduites après la maintenance (fig. 6.7) révèle un gain en puissance de 0.5 à 0.7 watt selon la longueur d'onde d'émission. Puisque le processus de maintenance est court et facile à exécuter, il sera possible de profiter des capacités maximales du système lors des prochaines séances de caractérisation.

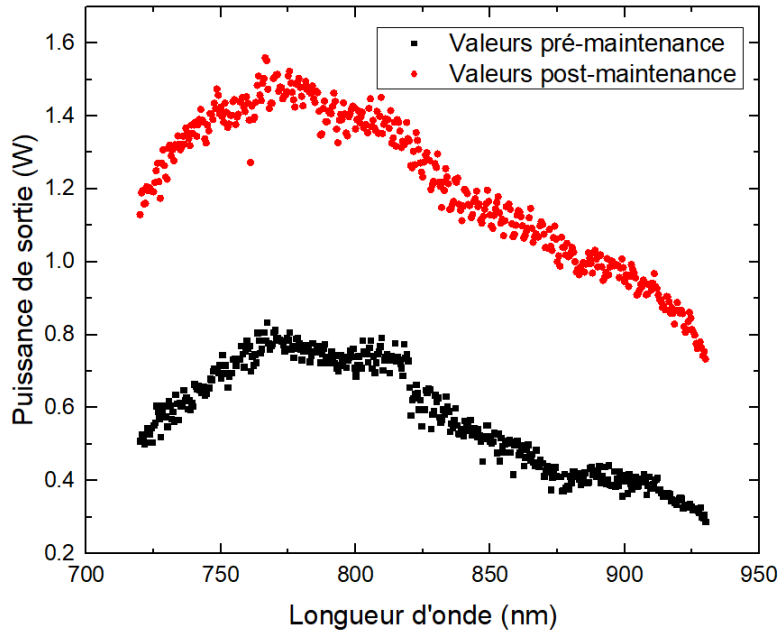


FIGURE 6.7 – Représentation graphique du gain en puissance suite aux étapes de maintenance.

6.4 Caractérisation I-V en fonction de la longueur d'onde

Malgré le fait qu'une transition électronique ne peut se produire que lorsqu'un photon avec une énergie spécifique excite un électron (section 2.3.1), la forme de la structure de bande du semiconducteur, la densité d'imperfection dans le matériau et la présence d'énergie thermique dans le système peuvent permettre la conversion de lumière à différentes longueurs d'onde. La caractérisation du rendement d'un dispositif en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente génère donc des spectres d'efficacité au lieu de pics discrets. L'information contenue dans ces spectres s'avère être pertinente dans le développement des dispositifs et dans l'évaluation des performances d'un échantillon. C'est pour ces raisons qu'un des objectifs principaux de ce projet est de concevoir un montage permettant d'effectuer automatiquement des séries de mesures I-V tout en ayant un contrôle précis sur la longueur d'onde de la lumière incidente. Depuis la mise en place du laser accordable, plusieurs séances

de caractérisation ont été effectuées sur une panoplie d'échantillons de manière à former des profils de performances avec un niveau de détails jusque là inaccessible. Dans l'intention de démontrer les nouvelles capacités du montage, l'analyse des résultats de quelques séances de caractérisation est fait dans la section suivante.

La fig. 6.8 contient les courbes d'efficacité en fonction de la longueur d'onde pour deux échantillons qui sont formé de six jonctions p/n chacune, mais qui possèdent des longueurs d'onde d'opération optimale différentes. Une analyse rapide révèle que l'efficacité de conversion maximale d'environ 62% l'échantillon PT6-G5793-073FS est obtenue sous un rayonnement à 815 nm. Dans le cas du PT6-G5793-099FS, une efficacité maximale d'environ 50% est mesurée sous une illumination à 870 nm. Idéalement, la longueur d'onde d'opération optimale est utilisée pour illuminer les échantillons, mais il est possible qu'un potentiel usager ne possède pas de laser avec un spectre d'émission approprié. Dans ce cas, les courbes d'efficacité en fonction de la longueur d'onde sont utilisées pour identifier l'échantillon qui offre les meilleurs rendements. Par exemple, le PT6-G5793-099FS a une efficacité de conversion d'environ 48% sous un rayonnement à 860 nm, un écart de 8% avec l'efficacité du PT6-G5793-073FS à la même longueur d'onde. La forme de ces courbes contient aussi l'information concernant les performances autour de la longueur d'onde optimale. Pour le PT6-G5793-073FS, des pertes d'efficacité maximale de 5% sont attendues pour une source émettant à ± 15 nm d'écart avec la longueur d'onde optimale. Par contre, la courbe d'efficacité du PT6-G5793-099FS n'est pas symétrique autour du point à 870 nm. En effet, des pertes d'efficacité maximales de 5% sont attendues pour les longueurs d'onde jusqu'à 40 nm plus courtes que 870 nm, mais seulement 3 nm plus longues. Ces données peuvent donc aider un usager à mieux choisir le dispositif approprié pour l'application désirée.

Finalement, ces courbes peuvent jouer un rôle important dans l'évolution des techniques de fabrication des nouveaux phototransducteurs. En effet, il faut pouvoir caractériser les performances des échantillon résultant afin d'optimiser les paramètres du procédé de fabrication. Il se peut qu'un dispositif atteigne l'efficacité désirée à la longueur d'onde visée, mais qu'une efficacité supérieure soit tout de même accessible à une autre longueur d'onde. Un échantillon peut aussi offrir des rendements nettement inférieurs à celui désiré et mener à la modification du procédé. Dans tous les cas, il est plus facile d'évaluer la qualité d'un dispositif et de son procédé de fabrication lorsqu'une grande quantité d'informations est disponible.

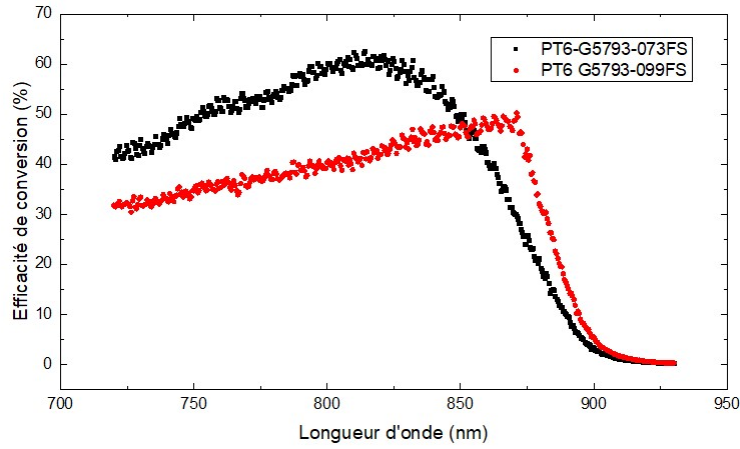


FIGURE 6.8 – Comparaison entre les courbes d'efficacité en fonction de la longueur d'onde pour les échantillons PT6 G5793-099FS et PT6 G5793-073FS.

Comme expliqué dans la section 5.3.3, le protocole de caractérisation employé consiste à effectuer une série de mesures I-V à différentes longueurs d'onde et de compiler les résultats de manière à créer un profil de performances cohérent. Il est donc possible d'analyser chaque courbe I-V individuellement et ainsi d'observer le comportement d'un échantillon à différente longueur d'onde. La fig. 6.9 contient quatre courbes I-V obtenues durant la caractérisation de l'échantillon PT6 G5793-099FS qui ont été choisies de manière à représenter la gamme de performance du dispositif. Les courbes à 730 nm et 900 nm correspondent aux mesures aux extrémités du spectre couvert par le laser, c'est-à-dire qu'elles ont été prises loin de la longueur d'onde d'opération idéale. Suite à l'analyse du graphique d'efficacité en fonction de la longueur d'onde (fig. 6.8), la courbe I-V à 870 nm correspond aux performances optimales de l'échantillon. Enfin, la courbe à 885 nm permet de voir la dégradation rapide du rendement après avoir dépassé la longueur d'onde optimale.

La courbe I-V à 870 nm contient les valeurs de tension en circuit-ouvert et de courant de court-circuit (section 3.2.2) les plus élevées avec des valeurs de 7.15 V et 0.095 A respectivement. Ces paramètres sont similaires à ceux de la courbe à 730 nm qui affiche un V_{oc} de 7.10 V et un I_{sc} de 0.091 A. De telles valeurs de V_{oc} concordent avec la valeur maximale théorique de 7.2 V associée aux échantillons avec 6 jonctions p/n (section 3.2.2). Lorsque la longueur d'onde optimale est dépassée, la valeur de ces paramètres ainsi que le rendement de l'échantillon diminuent rapidement. Le V_{oc} et le I_{sc} des courbes restantes ont des valeurs respectives de 7 V et 0.053 A pour la mesure à 885 nm et de 6.56 V et 0.014 A pour la mesure à 900 nm. Ces résultats permettent de comprendre que l'échantillon ne génère pas de puissance considérable pour les longueurs d'onde supérieures à 870 nm.

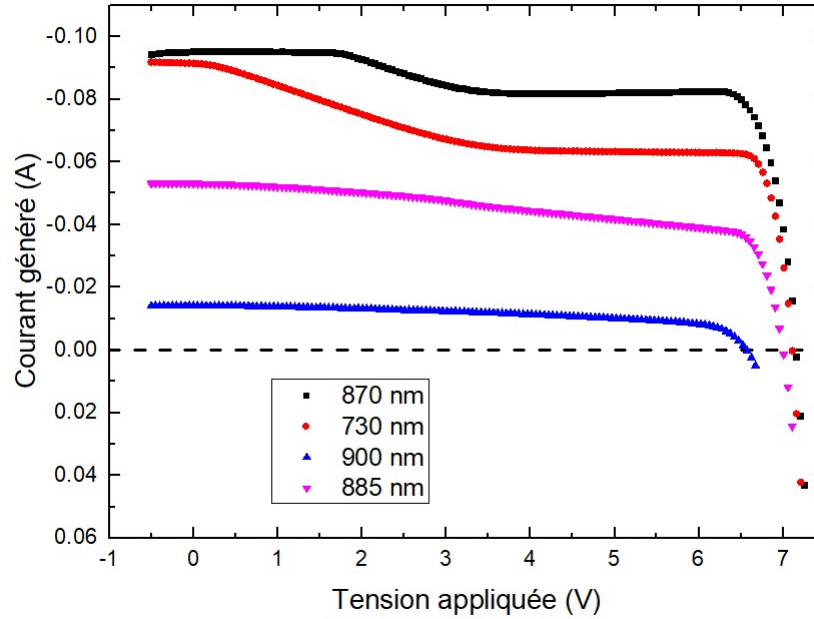


FIGURE 6.9 – Comparaison entre plusieurs courbe I-V prises à différente longueur d’onde de l’échantillon PT6 G5793-099FS

L’analyse de la forme des courbes I-V obtenues permet de comparer les valeurs de Fill factor et de repérer la présence de résistances parasites (section 3.2.2, fig. 3.10). Puisque les courbes à 730 nm et à 870 nm correspondent à une génération de puissance plus élevée, l’impact des résistances parasites est plus important que pour les courbes à 885 nm et 900 nm. La courbe à 870 nm indique que les résistances en série et en parallèle ne semblent pas affecter pas de façon considérable le rendement du dispositif. Par contre, la diminution graduelle du courant généré autour de 1.7 V signifie qu’une portion de la puissance produite est perdue sous forme de dissipation dans les couches de l’échantillon. Ce phénomène est aussi observable sur la courbe à 730 nm dès le début de la mesure I-V. La quantification de l’impact de ces *mismatch loss* se fait par le calcul du Fill factor à la longueur d’onde optimale. Dans ce cas, les pertes de puissance résultent en un Fill factor de 78% à 870 nm, un écart de 22% avec la courbe I-V d’une diode idéale possédant les mêmes valeurs de V_{oc} et de I_{sc} . Pour ce qui est des courbes I-V à 885 nm et 900 nm, la forme des courbes ne permet pas d’identifier adéquatement la présence de résistances parasites.

Parfois, l’analyse des courbes I-V individuelles mène à la découverte d’un dysfonctionnement d’un échantillon ou du système. Durant une séance de caractérisation en fonction de la longueur d’onde, le programme d’acquisition affiche les résultats des dernières courbes I-V mesurées. De cette façon, un usager peut suspendre la série de mesures et chercher à corriger les manipulations. Puisque les nouvelles capacités du montage sont récentes, il est d’autant plus important de pouvoir contrôler avec précision chaque étape du processus afin d’éviter d’endommager l’équipement et les dispositifs. La courbe I-V de la fig.6.10 résulte d’une séance de mesures effectuées sur l’échantillon PT6-G5793-073FS où la puissance de la

diode laser est posée à 16 watts. Au lieu de suivre le modèle du comportement I-V d'une diode, la courbe est découpée en sections distinctes à plus haute tension. Une investigation a révélé que l'angle de dispersion du faisceau au bout de la fibre causait un dysfonctionnement du dispositif. La mauvaise distribution de la lumière à la surface de l'échantillon causait une génération de courant non-uniforme à travers les différentes jonctions p/n et le rendement total en était réduit (section 2.3.4). Le remplacement de la fibre a permis de confirmer que l'échantillon PT6-G5793-073FS avait la capacité de convertir efficacement la lumière incidente comme le montre fig. 6.8. En outre, bien que le protocole de mesure soit conçu pour protéger l'utilisateur et les dispositifs de dommages potentiels, il est important que l'information soit accessible rapidement afin d'intervenir lors d'un dysfonctionnement du système.

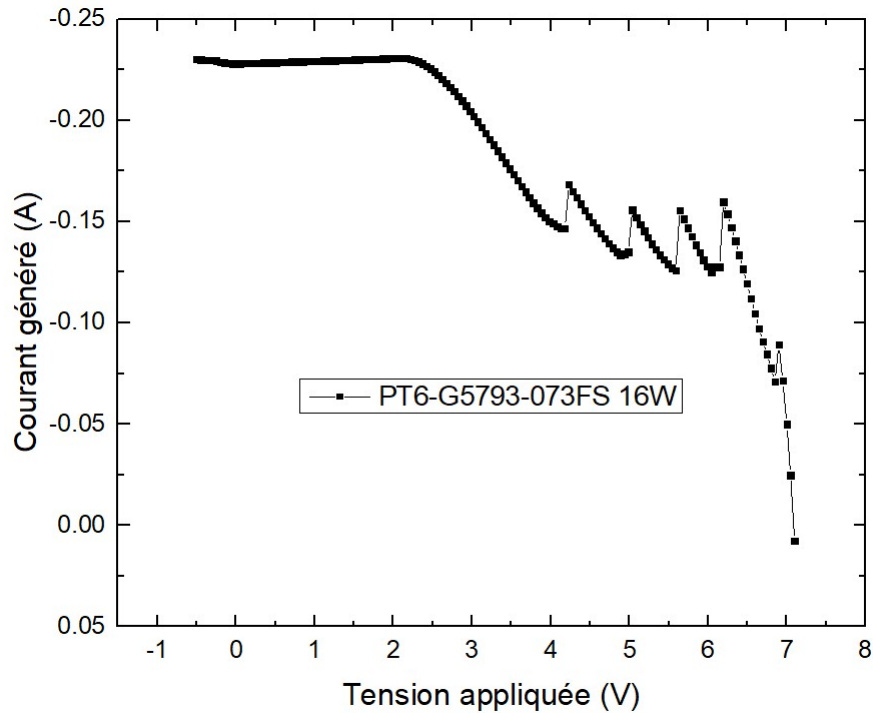


FIGURE 6.10 – Exemple de courbe I-V indiquant la présence d'un problème dans le procédé de mesure.

6.5 Caractérisation I-V en fonction de l'angle d'incidence

Les phototransducteurs à l'étude peuvent être utilisés de deux manières distinctes. Le faisceau qui provient d'une source laser peut être acheminé au dispositif à l'aide d'un guide tel qu'une fibre optique ou encore en laissant la lumière se propager dans un milieu tel que l'air ou le vide. La deuxième méthode implique qu'un travail d'alignement entre la source et le phototransducteur doit être effectué pour obtenir un rendement optimal. Il est donc pertinent de se pencher sur l'étude des performances d'un dispositif en fonction de l'angle d'incidence du faisceau afin d'estimer le gain en efficacité associé à un alignement précis. C'est pour cela que le second objectif principal du projet est d'installer un système per-

mettant d'effectuer des séries de mesures I-V sous plusieurs angles d'illumination différents. Une analyse de résultats obtenus à partir de ce montage est effectuée pour démontrer les nouvelles aptitudes du système.

Comme mentionné dans la section 2.1.2, la réfraction de la lumière dans un milieu transparent est un phénomène qui dépend de l'angle d'incidence des photons, de la longueur d'onde du faisceau et de la nature du matériau. Dans le cas d'un phototransducteur, le milieu réfringent est composé d'une couche antireflet et de plusieurs jonctions p/n semiconductrices. L'étude du rendement d'un dispositif en fonction de l'angle d'incidence du faisceau commence par l'identification de la longueur d'onde optimale. Pour ce faire, une série de mesures similaires à celles contenues dans la fig. 6.8 de l'efficacité en fonction de la longueur d'onde est effectuée. Un balayage en longueur d'onde par incréments de 5 nm sur tout le spectre est d'abord réalisé afin d'identifier la région d'intérêt. Ensuite, un balayage de la région par incréments de 1 nm est effectué et la longueur d'onde optimale est déterminée. Cette méthode révèle qu'un rayonnement à 820 nm est idéal pour l'échantillon PT6 H7233-043FS. Une mesure de l'efficacité de l'échantillon en fonction de l'angle d'incidence a ensuite été exécutée à partir du nouveau montage (section 4.2.1) et du protocole de mesure approprié (section 5.3.5). Des mesures similaires sont effectuées pour des émissions à 808 nm, 815 nm et 830 nm afin d'étudier le comportement du dispositif sous plusieurs conditions expérimentales.

Il est important de noter que l'alignement initial de l'échantillon et de la fibre doit être effectué manuellement. Par exemple, à l'aide d'une caméra de téléphone intelligent. Bien qu'il n'est pas possible de voir un rayonnement à 820 nm à l'oeil nu, les caméras communément intégrées dans les téléphones intelligents modernes peuvent capter le spectre de l'infrarouge. De plus, l'angle de rotation parcouru durant une mesure est calculé par le programme d'acquisition à partir du nombre de pas exécutés par le moteur. Il y a donc une certaine incertitude au niveau de la position relative de l'échantillon tout au long d'une série de mesures. Les résultats obtenus ne correspondent pas à des valeurs d'efficacité absolues, mais plutôt au comportement typique de l'échantillon sous différents angles d'illumination. Ce type de caractérisation a pour but d'évaluer de façon approximative les pertes de rendement possible associées à un mauvais alignement des composantes en plus d'exposer certaines configurations permettant de récupérer une portion de l'efficacité.

La fig. 6.11 contient les courbes d'efficacité en fonction de l'angle d'incidence obtenues à partir de l'échantillon PT6 H7233-043FS avec une puissance de diode laser de 16 watts. On assume que la courbe de rendement en fonction de l'angle d'incidence est symétrique autour de la normale afin de réduire la durée de la séance de caractérisation. Une rotation de 1.8° est effectuée entre chaque mesure I-V jusqu'à ce qu'une rotation totale de 59.4° soit complétée. Tout d'abord, la courbe à 820 nm contient la valeur d'efficacité la plus élevée pour un faisceau à incidence normale d'une valeur de 48.9%. Pour le même angle d'incidence, les courbes à 808 nm, 815 nm et 830 nm ont une valeur d'efficacité de 48.6%, 48% et 46% respectivement. Dans le cas de l'échantillon PT6 H7233-043FS, les pertes d'efficacité en fonction de la longueur d'onde ne sont pas symétriques autour de la longueur d'onde optimale. Pour les angles d'incidence supérieurs à 0° , les courbes à 808 nm et à 815 nm affichent des rendement

inférieurs à ceux à 820 nm avant de converger aux angles de 48.6° et 39.6° respectivement. L'écart d'efficacité maximale avec la courbe à 820 nm une valeur de 2.44% à 32.4° pour la courbe à 808 nm et une valeur de 2.44% à 32.4° et celle à 808 nm a une valeur de 1.69% à 21.6° pour la courbe à 815 nm. Lorsque l'angle d'incidence est assez élevé, les courbes à 808 nm, 815 nm et 820 nm suivent la même tendance et il n'y a plus d'écarts de performance significatifs entre les configurations étudiées. Les pertes d'efficacité associées à l'alignement des composantes ou à la longueur d'onde incidente sont généralement causés par une génération non-uniforme de courant au travers des jonctions p/n (section 3.1.2). Les points de convergence entre les trois courbes correspondent donc aux moments où la distribution de courant généré à travers la cellule est similaire.

Dans le cas de la courbe à 830 nm, il n'y a pas de convergence avec les valeurs d'efficacité à 820 nm. Au contraire, les valeurs d'efficacité obtenues pour les angles d'incidence supérieurs à 43.2° sont plus élevés que pour toutes les autres longueurs d'onde. Bien que le rendement soit faible avant 43.2° , l'efficacité commence à augmenter à partir de 39.6° pour finir avec un écart de plus de 7.3% à 59.4° . Ce phénomène n'a pas encore été étudié en profondeur, mais certaines hypothèses semblent pouvoir expliquer cette amélioration de rendement. Le mode de fonctionnement idéal d'un dispositif consiste à exposer la cellule à un rayonnement d'incidence normale avec une longueur d'onde optimale. Lorsque la longueur d'onde est trop longue, le taux d'absorption des couches semiconductrices est plus faible et la lumière peut parcourir une plus grande distance dans le volume avant d'être complètement atténuée (section 2.1.2). Cela cause une diminution de la génération de courant dans les jonctions au dessus de la structure et limite le rendement total du dispositif. Une augmentation de l'angle d'incidence du faisceau a comme effet d'allonger le trajet parcouru par la lumière dans chaque jonction p/n. La distance parcouru par la lumière ne correspond plus à l'épaisseur d'une jonction, mais plutôt à la distance entre les nouveaux points d'entrée et de sortie. La probabilité de création de paires électrons-trous est donc plus élevée pour les couches près de la surface (section 2.3.3) et le courant généré est plus important. Bien que le parcours optique soit aussi allongé dans les couches du dessous, la génération de courant est limitée par l'intensité de la lumière incidente qui est à son tour limitée par le processus d'absorption des jonctions du dessus. Un équilibre de la génération de courant à travers la cellule peut donc être obtenu et une portion des pertes d'efficacité peuvent être récupérées. Dans le cas de l'échantillon PT6 H7233-043FS, un gain en efficacité d'environ 2.4% est observé entre les performances minimales à 39.6° et le pic à 55.8° . Bien que les valeurs d'efficacité du pic ne soient pas supérieures à l'efficacité pour un faisceau d'incidence normale, les résultats indiquent qu'il y a tout même une façon de mitiger les pertes de rendement associées à l'utilisation de longueurs d'onde trop longues ou lorsque l'angle d'incidence doit être plus prononcé.

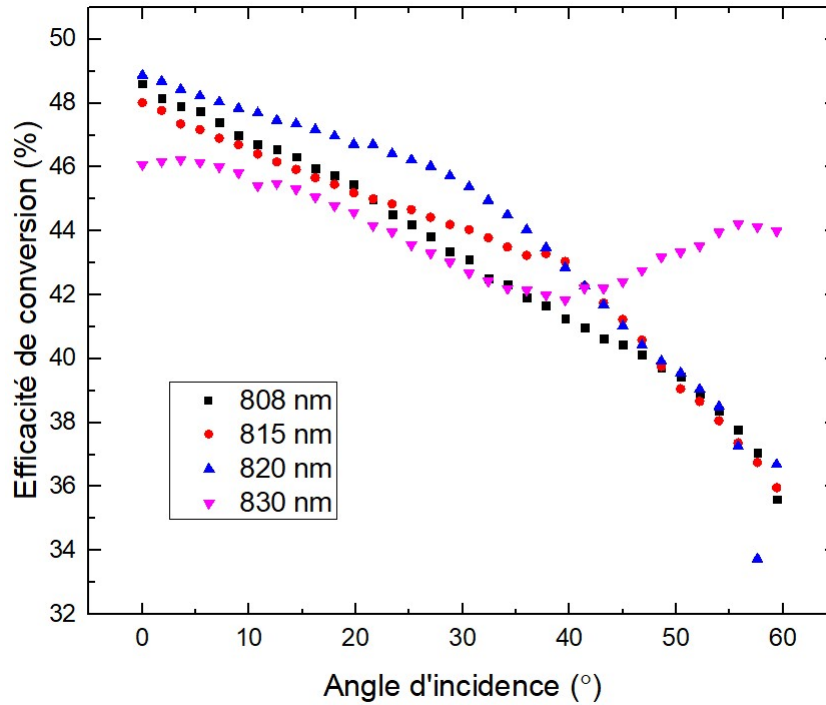


FIGURE 6.11 – Courbe d'efficacité en fonction de l'angle d'incidence effectué sur l'échantillon PT6-H7233-043FS. Durant cette mesure, la cellule à est exposé à un rayonnement à 825 nm et la puissance de la diode laser est posé à 14 watt.

Certaines mesures peuvent contenir des valeurs d'efficacité aberrantes lorsque l'angle d'incidence est assez élevé comme le montre la courbe à 820 nm de la fig. 6.11. Selon la tendance générale de la courbe, l'efficacité du dispositif lorsque l'angle d'incidence est posé à 57.6° devrait avoir une valeur d'efficacité d'environ 37% au lieu de la valeur obtenue de 33.7%. Une telle diminution d'efficacité peut être causée par une obstruction partielle du faisceau par les contacts métalliques sur l'échantillon. Les figures 6.12 et 6.13 contiennent des images prises au début et à la fin de la série de mesures effectuées avec l'échantillon PT6 H7233-043FS. La fig. 6.12 correspond à la configuration du système juste après le processus d'alignement manuel. La zone illuminée est comprise dans les bornes de la surface active de la cellule et tous les photons incidents ont la possibilité de participer à la génération de courant. Par contre, lorsque l'angle d'incidence est trop élevé, une portion de la lumière est bloquée par un des connecteurs métalliques sur le côté de la cellule comme le montre la fig. 6.13. Puisque la mesure de puissance est effectuée avant la fin du parcours optique (section 6.1), le programme assume toujours que tous les photons touchent la surface de l'échantillon. Le calcul d'efficacité emploie donc une puissance d'entrée trop élevée pour la génération de courant mesuré et les valeurs obtenues sont erronées. Cette obstruction a aussi comme effet de chauffer le support de l'échantillon, ce qui réduit d'autant plus le rendement du dispositif. Il est donc important de vérifier que le faisceau soit contenu dans les bornes de la surface active de la cellule tout au long de la mesure.

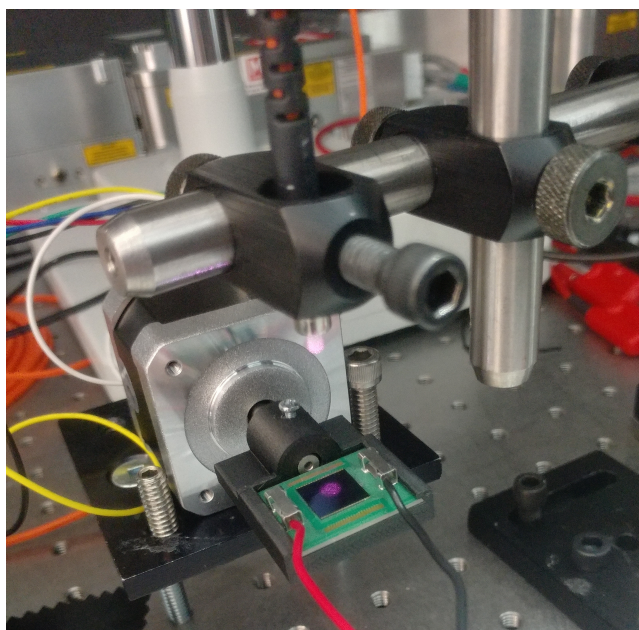


FIGURE 6.12 – Image prise avant une mesure d'efficacité en fonction de l'angle d'incidence. La lumière infra-rouge est capturé par une caméra de téléphone.

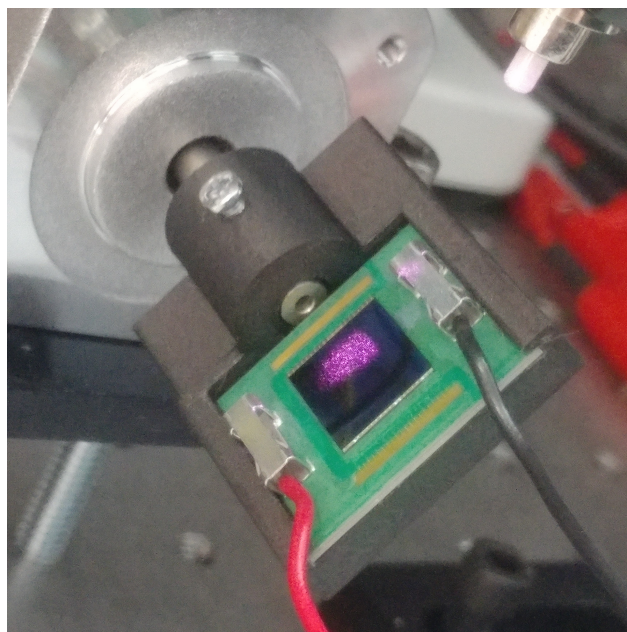


FIGURE 6.13 – Image prise à la fin d'une mesure d'efficacité en fonction de l'angle d'incidence. La lumière infra-rouge est capturé par une caméra de téléphone. Une partie du faisceau est bloqué par un des contacts métallique et le reste est étalé sur la surface de l'échantillon.

7 Conclusion

Dans le cadre de ce projet de maîtrise, plusieurs modifications ont été effectuées sur un montage de caractérisation I-V conventionnel afin de considérer les particularités des convertisseurs de puissance laser. Ce montage comprenait une panoplie de lasers monochromatiques alimentés à partir de sources de puissance et les mesures I-V étaient effectuées à partir d'un instrument de mesure et de tension. Les sources de puissance devaient être configurées manuellement selon le laser utilisé et la puissance de sortie désirée. Les manipulations possibles étaient limitées aux mesures I-V avec ou sans illumination à une seule longueur d'onde incidente en plus d'être plus longues à effectuer que ce qui est présentement possible. Afin d'élargir les capacités du montage et d'étudier le comportement I-V des dispositifs en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente, un laser accordable à haute puissance avec un spectre d'émission de 725 nm à 960 nm a été introduit au système. Le laser peut contrôler la puissance de sa diode, mais n'a pas la capacité de mesurer la puissance du faisceau à la sortie de la fibre optique. Un coefficient de proportionnalité entre la puissance au bout de la fibre et celle expulsée du système par l'ouverture d'évacuation sur le côté a donc été déterminé afin de pouvoir mesurer la puissance du faisceau qui atteint les échantillons. Lorsque l'angle de polarisation est posé à 138° , 88% de la puissance totale du faisceau est acheminée au bout de la fibre. Ce ratio s'est avéré être stable à plusieurs puissances de diode laser données et à différentes longueurs d'onde d'émission. Une caractérisation de la puissance de sortie du laser en fonction de la longueur d'onde d'émission a révélé que le spectre peut être séparé en trois régimes de puissance, de 720 à 820 nm, de 820 à 880 nm et de 880 à 950 nm. Les spectres d'absorption de l'oxygène, celui de l'eau et les transitions entre les régimes de puissance ont tous comme effet d'allonger le processus de stabilisation de la longueur d'onde du laser. Ces délais supplémentaires sont pris en compte par le programme d'acquisition de manière à optimiser la durée des mesures. Il est maintenant possible de calculer la valeur de la puissance de sortie à partir du coefficient de proportionnalité sans se préoccuper des fluctuations de puissance à différentes longueurs d'onde tout en s'assurant que le système ait le temps de se stabiliser avant les mesures. Enfin, suite à la découverte d'une perte de puissance de sortie de 0.3 à 0.5 watt en 15 jours, les protocoles de maintenance et leurs effets ont été étudiés et un gain en puissance de 0.5 à 0.7 watt a été obtenu.

Puisque le remplacement de la cartouche de dessiccation et l'alignement des miroirs dans le parcours optique sont des manipulations simples et rapides, les capacités optimales du laser peuvent être exploitées à chaque séance de caractérisation. Un support rotatif a été ajouté au système afin de conduire des mesures I-V en fonction de l'angle d'incidence du faisceau. Une analyse de résultats obtenus à partir du montage a révélé qu'il est possible de récupérer une portion des pertes d'efficacité lorsque les conditions ne sont pas optimales. Dans le cas du PT6 H7233-043FS, les valeurs d'efficacité pour les courbes à 808 nm et 815 nm sont inférieures aux valeurs à la longueur d'onde optimale de 820 nm et ce, pour toutes les valeurs d'angle d'incidence. La courbe à 808 nm converge avec celle à 820 nm à partir de 48.6° et la courbe à 815 nm converge à partir de 39.6° . Par contre, la courbe à 830 nm affiche un gain d'efficacité à partir de 39.6° et termine avec un écart d'efficacité avec la courbe à 820 nm de plus de 7.3% à 59.4° . Les longueurs plus longues pénètrent plus facilement dans

un matériau et réduisent la génération de courant dans les jonctions positionnées au dessus du dispositif. Une génération non-uniforme de courant dans une cellule photovoltaïque limite le rendement et augmente la chaleur qui doit être dissipée. Il est donc possible que l'angle d'incidence prononcé allonge le trajet parcouru par le faisceau dans les jonctions p/n du dessus et améliore la génération. Les modifications du système de caractérisation sont supportées par un programme d'acquisition Labview dont l'objectif est de minimiser la durée des séries de mesures, tout en protégeant les échantillons et l'utilisateur des dommages associés à l'utilisation de lasers à haute puissance. Un intérêt particulier a été accordé à la facilité d'utilisation et à l'accès rapide à l'information pour accélérer le processus de caractérisation I-V.

Les modifications apportées au montage expérimental actuel permettent de conduire des séries de mesures I-V adaptées aux particularités des convertisseurs de puissance laser. Bien que la substitution de la lampe solaire par une source laser ait été imposée par le mode d'opération intrinsèque des phototransducteurs à l'étude, le contrôle sur les paramètres des mesures et l'efficacité des protocoles de caractérisation surpassent ceux des montages conventionnels. L'étude du rendement d'un dispositif photovoltaïque en fonction de la longueur d'onde d'émission est communément effectué à partir de filtres placés devant une source de lumière polychromatique ou avec une gamme de sources lasers monochromatiques. Ces méthodes sont limitées par le nombre de filtres ou de lasers disponibles et il faut l'intervention d'un usager pour manipuler l'équipement entre chaque mesure. Grâce au travail d'optimisation des protocoles de mesure inclus dans le programme d'acquisition et à la flexibilité du laser accordable, il est possible d'effectuer des séries de plus de 430 mesures I-V individuelles sur un spectre de 720 nm à 950 nm par incréments de 0.5 nm en environ 2 heures et 30 minutes. L'élimination des manipulations manuelles performées par l'utilisateur a aussi l'avantage de réduire les chances d'endommager l'équipement et de diminuer le risque d'accident menant à une blessure. L'ajout du montage de caractérisation I-V en fonction de l'angle a permis de contourner un des obstacles associé avec l'utilisation de source laser : la propagation uni-directionnelle de la lumière. L'étude de l'efficacité de conversion en fonction de l'angle d'incidence est une pratique commune dans le développement des dispositifs photovoltaïques. Puisque les phototransducteurs à l'étude peuvent être opérés sans fibre optique, c'est-à-dire que le faisceau laser se propage dans l'air ou dans le vide, l'ajout du support rotatif accorde au montage des capacités semblables aux systèmes de caractérisation plus traditionnels. Par contre, la combinaison du support rotatif et du laser accordable permet de conduire des séries de mesures complexes peu répandues dans le domaine. Il est maintenant possible d'identifier les configurations permettant de contourner les pertes d'efficacité lorsque les conditions expérimentales ne sont pas optimales. Le montage contient donc les outils nécessaires pour considérer les caractéristiques particulières des convertisseurs de puissance laser à l'étude tout en étant simple d'utilisation.

Les modifications apportées au montage de caractérisation durant ce projet représente une avancée significative au niveau de l'étude des convertisseurs de puissance laser, mais plusieurs éléments peuvent encore être améliorés afin de faciliter l'utilisation de l'équipement et d'optimiser l'efficacité des mesures. En ce qui concerne les manipulations du laser

accordable, il serait pertinent d'ajouter des fonctions au programme d'acquisition au fur et à mesure que de nouveaux protocoles de commandes développés par MSquared sont publiés. La capacité d'allumer, d'éteindre et de changer la puissance de la diode laser permettrait d'introduire des protocoles de sécurité additionnels, incluant une fermeture d'urgence de la source laser en cas d'exposition involontaire au faisceau. Dans le cas de la caractérisation en fonction de l'angle d'incidence, le montage conçu lors de ce projet est adéquat pour effectuer des mesures sans toutefois offrir autant de flexibilité que le montage avec le laser accordable. L'alignement du faisceau doit être effectué manuellement et la portion du trajet parcouru par la lumière entre le bout de la fibre et la surface de l'échantillon expose les usagers à un risque de blessures potentielles. Idéalement, le montage serait confiné par un boîtier d'un matériau avec la capacité de bloquer les faisceaux lasers à haute puissance et un système de support plus complexe serait ajouté pour assurer un placement adéquat du moteur et de la fibre optique. Le développement de supports à échantillons accompagnés de mécanismes de refroidissement permettrait aussi de contrer les effets de chauffage générés par les rayons à haute puissance. Finalement, une étude en profondeur de la relation entre l'impact de l'angle d'incidence et la longueur d'onde d'émission sur l'efficacité d'un dispositif pourrait être faite de manière à pouvoir expliquer la forme des courbes obtenues (fig. 6.11). Ces résultats pourraient mener à la découverte de configurations expérimentales et de processus physiques favorisant une génération uniforme de courant dans un dispositif photovoltaïque.

Références

- [1] *Handbook of Optical Constants of Solids*, Edited by Edward D. Palik, 1985, Academic Press.
- [2] *Optics Third (3rd) Edition* Eugene Hecht, Alfred Zajac, 1996
- [3] *Spectral collocation method with a flexible angular discretization scheme for radiative transfer in multi-layer graded index medium* Wei Lingyang, Hong Qi, Ya-Tao Ren, Xiao-Ying Yu, Mars 2017, Infrared Physics & Technology.
- [4] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10759
- [5] *Colour*, Kurt Nassau, janvier 2020, Encyclopaedia Britannica, inc.
- [6] *IFT3355; Infographie Illumiation locale*, Victor Ostromoukhov, Dép. I.R.O., Université de Montréal.
- [7] *Nowcasting and very short term forecasting of the global horizontal irradiance at ground level : application to photovoltaic output forecasting*, Romain Dambreville, octobre 2014, Université Bretagne Sud.
- [8] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Polarisation_\(optique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Polarisation_(optique))
- [9] *Brillouin Spectroscopy of a Novel Baria-Doped Silica Glass Optical Fiber* Dragic. P & Kucera, Courtney & Furtick, Joshua & Guerrier, J & Hawkins, Thomas & Ballato, 2013, Optics express.
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Wave_interference
- [11] <http://tpe-telecran.auxlazaristes.fr/fonctionnement-de-la-television>
- [12] <https://www.cronodon.com/Atomic/Photon.html>
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment
- [14] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Électron>
- [15] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/barr.html>
- [16] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-effet-compton-7711/>
- [17] <https://opentextbc.ca/chemistry/chapter/6-3-development-of-quantum-theory/>
- [18] *2.2 Hydrogen emission spectrum (SL)*, Mike Sugiyama Jones, 2014, vidéo Youtube.
- [19] http://public.iutenligne.net/chimie/valls/chimie-du-solide/propri_semiconducteurs_1.html
- [20] http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_02.html
- [21] <https://fr.wikipedia.org/wiki/semiconducteur>
- [22] <http://www.industrious.info/24/11300-zener-diode-band-diagram.html>
- [23] https://en.wikipedia.org/wiki/Depletion_region
- [24] <http://www.pvmeasurements.com/Products/Discontinued-Products/qex7-solar-cell-spectral-response-quantum-efficiency-ipce-measurement-system.html>
- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-junction_solar_cell
- [26] *Analysis of Silicon Solar Cell Device Parameters using PC1D*, Al Montazer Mandong, Abdullah Üzümlü, Sakarya University Journal of Science, 2019.

- [27] *Simulating the Electrical Characteristics of a Photovoltaic Cell Based on a Single-Diode Equivalent Circuit Model* Syeda Adila AFGHAN, Husam ALMUSAWI, Husi GEZA, University of Oradea, mai 2017.
- [28] <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-cpv/cpv-solar-cells>
- [29] https://en.wikipedia.org/wiki/Anti-reflective_coating
- [30] <http://solarconsultant.ca/multi-junction-solar-cell/triple-junction-solar-cell>
- [31] *High efficiency phototransducers based on a novel vertical epitaxial heterostructure architecture (VEHSA) with thin p/n junctions.* Mark C A York and Simon Fafard 2017 J. Phys. D : Appl. Phys. 50 173003
- [32] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Diode>
- [33] http://depts.washington.edu/cmditr/modules/opv/physics_of_solar_cells.html
- [34] <http://resources.solmetric.com/get/GuidetoInterpretingI-VCurves.pdf>
- [35] <http://resources.solmetric.com/get/GuidetoInterpretingI-VCurves.pdf>
- [36] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/dark-iv-testing>
- [37] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/dark-iv-testing>
- [38] *External quantum efficiency measurement of solar cell.*, Ananda, Wisnu, 2017, 450-456. 10.1109/QIR.2017.8168528.
- [39] *CPV Cell Infant Mortality Study : Preprint.* Bosco, Nick & Sweet, Cassi & Silverman, Timothy & Kurtz, Sarah. (2011). 1407. 10.1063/1.3658348.
- [40] https://www.solarnovus.com/inspection-and-measurement-of-pv-ingots-wafers-and-cells_N5920.html
- [41] *Characterization of high-efficiency c-Si CPV cells.* Pravettoni, Mauro Galleano, Roberto Fucci, Raffaele Kenny, Robert Romano, Antonio Pellegrino, Michele Aitasalo, Tuomas Flaminio, Giovanni Privato, Carlo Zaaïman, Willem Dunlop, Ewan., 2011, Progress in Photovoltaics Research and Applications. 19. 898-907. 10.1002/pip.1101.
- [42] *The Impacts of Tracking System Inaccuracy on CPV Module Power.* Zsiborács, Henrik Hegedűsné Baranyai, Nóra Vincze, András Weihs, Philipp Schreier, Stefan Gützer, Christian Revesz, Michael Pintér, Gábor., 2020, Processes. 8. 1278. 10.3390/pr8101278.
- [43] <https://www.linearmotiontips.com/stepper-motors-differences-between-permanent-magnet-variable-reluctance-and-hybrid-types/>
- [44] www.polulu.com
- [45] <https://www.norwegiancreations.com/2014/12/arduino-tutorial-stepper-motor-with-easydriver/>
- [46] *SolsTiS Narrow Linewidth, Tunable CW Ti:Sapphire Laser User Manual v10.3*, MSquared
- [47] <http://www.starkeffects.com/Fabry-Perot-Interferometer.shtml>
- [48] *Equinox User Manual v1.3*, MSquared